

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y**  
**FLUIDOS**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
FLUJO DE CALOR EN UN RECEPTOR  
TUBULAR CON SALES FUNDIDAS**

Autor: Sara Medina Vergel

Tutora: Carolina Marugán Cruz

Leganés, septiembre de 2018



# Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mi tutora, Carolina Marugán, por depositar en mí su confianza para realizar este trabajo y al departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos por permitirme realizar este proyecto en sus instalaciones, en especial a María Fernández y a Celia Sobrino por prestarme su ayuda siempre que ha sido necesario.

A toda la gente que he conocido estos años de carrera, en especial a Alejandra, Daniel, Javier, Suraj, Inma e Isa, por alegrar cada mala hora pasada entre estas aulas y fuera de ellas.

A mis amigas de toda la vida, en especial a Laura, por estar al otro lado del teléfono siempre que hay un problema.

A Víctor, por prestarse siempre aunque no se lo pidan.

A Javier, por enseñarme siempre el lado positivo de todo.

A mi abuela, por seguir creyendo siempre en mí.

A mi madre, porque nunca nada sería posible sin ella y gran parte de esto es suyo.

A mi hermana, por enseñarme a vivir, a convivir y a levantarme en cada caída.



## Resumen

Actualmente, el desarrollo de los países está directamente relacionado con el cambio climático y por lo tanto con las consecuencias que este conlleva. Se ha demostrado que el ser humano consume en un solo año lo que la naturaleza tarda un millón de años en producir, lo cual ha provocado nefastas consecuencias como la subida de la temperatura terrestre o la alteración del efecto invernadero.

En esta coyuntura, las energías renovables presentan un futuro prometedor como sustitutas de las fuentes de energía tradicionales. La energía solar es una de las más importantes y utilizadas pudiendo distinguir dos tipos según la tecnología empleada: térmica y fotovoltaica.

Por un lado, a lo largo de este trabajo se realizará un análisis de la situación de las energías renovables haciendo hincapié en la solar térmica, teniendo en cuenta los tipos de centrales y las partes que la forman, y realizando un estudio de las ventajas e inconvenientes de la utilización de dichas centrales.

Por otra parte, el objetivo fundamental de este proyecto es la realización de un estudio de la transferencia de calor en los tubos de las centrales térmicas, que trabajan exclusivamente con radiación solar para comprobar la viabilidad de estas instalaciones y, en su defecto, mejorar su diseño.

## Abstract

Nowadays, countries development is directly connected to the climate change and therefore, to its consequences. As a proven fact, it only takes one year to human being to consume what the Earth is able to produce in a thousand years itself. Consequently, the world is already affected by the impacts such as abnormal high temperatures and greenhouse effect alteration.

Due to the stated, renewable energies show a promising future as an alternative to the conventional energies sources. Solar energy is one of the most important types of renewable energies. It comes with two main variants, which are thermal and photovoltaic energies.

On the one hand, this project document presents an analysis of the current situation of renewable energies focusing on thermal solar energy. For instance, it explains the different power plants types of this sort; and an investigates their correspondent advantages and disadvantages.

On the other hand, the core reason of this project is the realization of heat transfer study of the tubes operating in thermal solar power plants. A viability check of the installations together with investigation of their possible design improvements are the main outcomes of this document.



# Índice de contenidos

Capítulo 1 .....	1
1.1    Introducción .....	1
1.2    Objetivos .....	2
1.3    Planificación y desarrollo .....	2
1.4    Presupuesto .....	4
1.5    Estructura de la memoria .....	6
Capítulo 2. Estado del arte.....	7
2.1. Los combustibles fósiles y el cambio climático .....	7
2.2. Las energías renovables .....	10
2.2.1. Energía eólica .....	11
2.2.2. Energía hidráulica.....	12
2.2.3. Energía solar fotovoltaica.....	12
2.2.4. Biomasa .....	13
2.2.5. Energía termosolar.....	14
Capítulo 3. Descripción del proyecto .....	21
3.1 Descripción de la instalación .....	22
3.1.1 Circuito de sales .....	22
3.1.2 Circuito de refrigeración.....	26
3.1.3 Sistema de adquisición de datos .....	27
3.1.4 Sistema de control .....	31
Capítulo 4. Medidas experimentales .....	34
4.1 Mediciones en la placa.....	34
4.2 Imágenes de la transferencia de calor .....	53
4.3 Mediciones con el circuito de sales .....	55
Capítulo 5. Conclusiones.....	62
Capítulo 6. Bibliografía .....	64
Capítulo 7. Anexos .....	67
ANEXO I: Manual de operación del inductor .....	67
ANEXO II: Puesta en marcha del sistema de traceado.....	71



---

ANEXO III: Encendido de las resistencias del depósito .....	73
ANEXO IV: Puesta en marcha de las sales .....	74

## Índice de tablas

Tabla 1. Descripción etapas del desarrollo .....	3
Tabla 2. Desglose coste de personal .....	4
Tabla 3. Desglose coste de material .....	5
Tabla 4. Coste total .....	5
Tabla 5. Poderes caloríficos aproximados de los combustibles fósiles [5][6].....	8
Tabla 6. Propiedades físicas de las sales[27].....	25
Tabla 7. Intervalo de temperaturas en la posición 1 .....	38
Tabla 8. Intervalos de temperatura en la posición 2 .....	41
Tabla 9. Intervalo de temperatura en la posición 3.....	43
Tabla 10. Intervalo de temperaturas en la posición 4.....	46
Tabla 11. Intervalos de temperatura en la posición 5 .....	48
Tabla 12. Intervalos de temperaturas en la posición 6 .....	51
Tabla 13. Intervalos de temperaturas en la posición 7 .....	53

## Índice de figuras

Figura 1. Desarrollo del proyecto .....	3
Figura 2. Colector cilindro-parabólico [15].....	15
Figura 3. Concentrador lineal Fresnel [16].....	16
Figura 4. Concentrador disco parabólico [17] .....	17
Figura 5. Concentrador de torre [17] .....	18
Figura 6. Configuración de central de canales parabólicos [18] .....	19
Figura 7. Configuración de central de torre [18] .....	19
Figura 8. Esquema de una instalación de energía solar térmica [19] .....	20
Figura 9. Elementos del circuito de sales .....	22
Figura 10. Propiedades de la lana de roca[24].....	23
Figura 11.Principios del calentamiento por inducción[25] .....	24
Figura 12. Circuito de refrigeración .....	26
Figura 13. Rangos y límites de error del termopar [28] .....	28
Figura 14. Tarjetas de adquisición.....	31
Figura 15. Cuadro eléctrico .....	33
Figura 16. Simulación placa plana .....	34
Figura 17. Esquema posiciones en la tabla.....	35
Figura 18. Propiedades termofísicas de sólidos metálicos .....	35
Figura 19. Temperatura del termopar en la posición 1 .....	37
Figura 20. Flujo de calor en el sensor en la posición 1 .....	37
Figura 21. Temperatura en el sensor en la posición 1 .....	38
Figura 22. Temperatura en el termopar en la posición 2 .....	39
Figura 23. Flujo de calor en el sensor en la posición 2 .....	40
Figura 24. Temperatura en el sensor en la posición 2 .....	40
Figura 25. Temperatura en el termopar en la posición 3 .....	42
Figura 26. Flujo de calor en el sensor en la posición 3 .....	42
Figura 27. Temperatura en el sensor en la posición 3 .....	43
Figura 28. Temperatura en el termopar en la posición 4 .....	44
Figura 29. Flujo de calor en el sensor en la posición 4 .....	45
Figura 30. Temperatura en el sensor en la posición 4 .....	45
Figura 31. Temperatura en el termopar en la posición 5 .....	47
Figura 32. Flujo de calor en el sensor en la posición 5 .....	47
Figura 33. Temperatura en el sensor en la posición 5 .....	48
Figura 34. Temperatura en el termopar en la posición 6 .....	49
Figura 35. Flujo de calor en el sensor en la posición 6 .....	50
Figura 36. Temperatura en el sensor en la posición 6 .....	50
Figura 37. Temperatura en el termopar en la posición 7 .....	51
Figura 38. Flujo de calor en el sensor en la posición 7 .....	52

Figura 39. Temperatura en el sensor en la posición 7 .....	52
Figura 40. Imagen térmica de encendido del inductor .....	54
Figura 41. Imagen térmica tras 11 minutos .....	54
Figura 42. Distribución termopares en el tubo .....	55
Figura 43. Temperatura de las sales en el depósito .....	56
Figura 44. Termopares en el tubo al 10%. Sección C-C .....	57
Figura 45. Termopares en el tubo al 10% .....	58
Figura 46. Termopares del depósito de sales.....	59
Figura 47. Termopares en el tubo al 20%. Sección C-C .....	60
Figura 48. Termopares del tubo al 20% .....	61
Figura 49. Pantalla de programación del Sinac .....	68
Figura 50. Termostato del sistema de traceado .....	71
Figura 51. Pantalla del variador de frecuencia .....	74

# Capítulo 1

En este capítulo se expondrán los objetivos a alcanzar con la realización de este Trabajo Fin de Grado, así como la planificación de este y un presupuesto aproximado. En el último punto se realizará un breve resumen de los contenidos de cada capítulo.

## 1.1 Introducción

Actualmente uno de los principales objetivos medioambientales consiste en frenar el cambio climático que se está produciendo en nuestro planeta. Una de las soluciones planteadas consiste en reducir el uso de combustibles fósiles potenciando así la utilización de energías renovables.

Siendo España un país con un alto número de días de sol, tanto las tecnologías fotovoltaicas como termosolares, trabajando en alto rendimiento, podrían sustituir la mayor parte de las explotaciones de energía nuclear y de carbón. Además, si se complementara con el uso de la energía eólica e hidráulica se conseguiría eliminar totalmente el uso de las energías más tradicionales[1].

El principal problema sin resolver es la falta de gestionabilidad de dichas energías. Por ejemplo, si se produce energía eléctrica en exceso a partir de estas infraestructuras y no se puede almacenar a un coste razonable, será difícil alcanzar un sistema totalmente renovable, ya que se tendrían que incluir elementos para convertir dicha energía eléctrica en mecánica, química o electromagnética.[2]

Cabe destacar que en los últimos años la energía termosolar se ha convertido en una de las energías renovables más potentes en España, entre las cuales predominan las centrales de torre por su alta eficiencia. Por dicho motivo, este TFG se basa en el análisis de estas centrales térmicas compuestas, principalmente, por un receptor externo dentro del cual circulan sales fundidas como fluido caloportador.

## 1.2 Objetivos

Los objetivos generales de este proyecto consisten en la realización de un estudio detallado de la distribución de temperaturas, tanto en el fluido que circula por el interior de los tubos como en las paredes de estos, concluyendo con un estudio del estrés térmico sufrido por los tubos receptores. Para ello se realiza una instalación, cuyos elementos se explican a lo largo de esta memoria, que simula el paso de las sales fundidas por los tubos de las torres con ayuda de un inductor, cuyo calor proporcionado equivaldría al calor absorbido por el tubo a través de radiación solar.

Previamente a la puesta en marcha de la instalación, se realiza un análisis de la transferencia de calor, proporcionada por el inductor, en una placa plana de acero inoxidable 304 con el objetivo de cuantificar, a través de un termopar tipo k soldado a la placa, las pérdidas de calor en el momento en el que se alcanza el estado estacionario y corroborar así la temperatura correcta que debería tener la placa.

Para conseguir estos objetivos es necesaria la realización de los siguientes hitos:

- Creación de una instalación para la simulación del flujo de sales fundidas a través de los tubos de las centrales termosolares.
- Programación de una instalación de medida de flujo a través del programa Labview, que cuantificará tanto la temperatura como el flujo de calor que absorbe el material.

## 1.3 Planificación y desarrollo

El presente proyecto comenzó a desarrollarse a principio de marzo de 2018 con la búsqueda de distintas fuentes bibliográficas y el estudio del estado actual de las energías renovables en España, además del funcionamiento de las centrales térmicas haciendo hincapié en las termosolares de torre en las que se basa el estudio de este proyecto.

El trabajo se retomó en junio, cuando los permisos de entrada y los elementos necesarios para realizar las pruebas estaban disponibles. Tras el aprendizaje de puesta en marcha, apagado y resolución de posibles alarmas del sistema de refrigeración se comenzaron las pruebas de medición de la placa plana. Al principio, sólo se medía el flujo de calor que llegaba a la placa y posteriormente se instaló un termopar tipo K, en la superficie de ésta, para la medición de la temperatura de la pared. Una vez realizadas varias pruebas en la misma posición de la bobina, se realizaron mediciones a distintas distancias del sensor. También se realizaron una serie de videos con la cámara termográfica sobre una placa, sin ningún tipo de sensor, para observar cómo se transfiere el calor en el momento en el que se enciende el inductor.

A finales de julio se realizaron las mediciones con el circuito de sales en movimiento y se terminó con la parte experimental de este proyecto.

Por último los meses de agosto y septiembre de 2018 se dedicaron a la redacción de la presente memoria, el análisis en mayor profundidad de los resultados obtenidos y a la depuración de las conclusiones obtenidas a partir del análisis experimental.

La consecución de las distintas tareas llevadas a cabo se representa en la Figura 1.

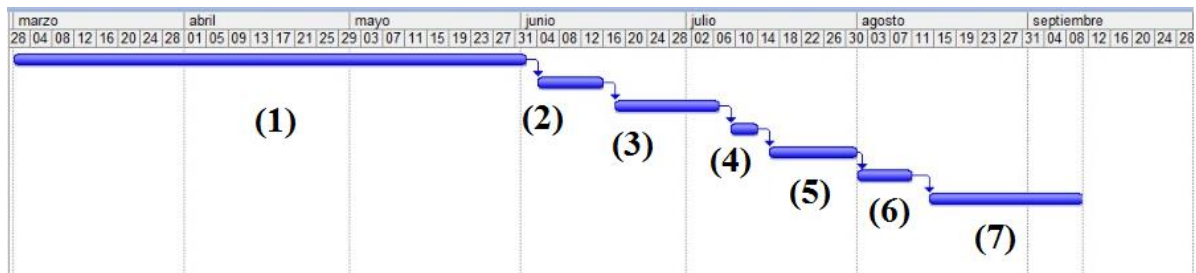


Figura 1. Desarrollo del proyecto

En la Tabla 1 se muestra la descripción de las etapas del desarrollo del proyecto, especificando la tarea realizada en cada etapa así como la fecha de comienzo y final de cada una de ellas

Tabla 1. Descripción etapas del desarrollo

	Nombre de la tarea	Duración	Comienzo	Fin
(1)	Búsqueda bibliográfica	67 días	01/03/2018	01/06/2018
(2)	Aprendizaje utilización de la instalación	10 días	04/06/2018	15/06/2018
(3)	Realización ensayos sobre placa plana	5 días	18/06/2018	06/07/2018
(4)	Tratamiento de datos obtenidos	15 días	09/07/2018	13/07/2018
(5)	Realización ensayos con circuito de sales	12 días	16/07/2018	31/07/2018
(6)	Análisis en profundidad de los resultados	8 días	01/08/2018	10/08/2018
(7)	Redacción de la memoria	20 días	14/08/2018	10/09/2018

## 1.4 Presupuesto

En este apartado se pretende estimar el coste económico que supone la realización de este Trabajo de Fin de Grado, teniendo en cuenta tanto los costes personales asociados a las horas de trabajo de alumno y profesores tanto como el coste material utilizado.

Respecto a los costes personales, el trabajo del alumno se ha estimado en una media de 4 horas diarias durante los meses en los que se ha desarrollado el proyecto. Considerando 20 días de trabajo al mes, el tiempo total empleado por el alumno asciende a 320 horas. También se han de tener en cuenta los costes correspondientes al personal involucrado en el proyecto, como los técnicos encargados del montaje y reparaciones de la instalación, y la participación de un ingeniero senior para la supervisión de la correcta realización de los estudios de análisis. Dichos costes de personal se esquematizan en la Tabla 2.

Tabla 2. Desglose coste de personal

Puesto	Coste/hora	Horas	Coste
Alumno	11.25	320	3680
Ingeniero senior	40.2	160	6432
Técnicos	7.5	80	600
<b>Coste total</b>			<b>10712</b>

En cuanto al coste de material utilizado en este proyecto se han tenido en cuenta todos los elementos que forman la instalación, además de las licencias de software que se han necesitado para el estudio de los resultados, como Labview y Matlab, los cuales han sido facilitados por la Universidad. Para el coste de amortización de la maquinaria se ha tenido en cuenta la amortización fiscal aprobada en los presupuestos generales del Estado, que para este tipo de inmovilizado corresponde a una amortización lineal de 8 años. En otros casos, para calcular la amortización anual habría que tener en cuenta los medios de financiación utilizados para cada bien y se podría aplicar la amortización lineal teniendo en cuenta el número de años de los préstamos que financian cada uno de los bienes. En la Tabla 3 se puede observar un desglose del coste de material.



**Tabla 3. Desglose coste de material**

Elemento	Precio de compra	Amortización mensual	Meses de utilización	Coste
Depósito de almacenamiento	12765	132.97	4	531.875
Resistencias del depósito	4002.68	41.694	4	166.78
Bomba situada dentro del depósito	3600	37.5	4	150
Tubo receptor y válvulas	2300	23.958	4	95.8334
Inductor	20000	208.33	4	833.33
Bomba auxiliar	448	4.667	4	18.667
Máquina de refrigeración	2882	20.021	4	120.08
Convertidor de frecuencia	294	3.0625	4	12.25
Sistema de traceado	5116.12	53.293	4	213.17
Depósito del sistema de refrigeración	2426	25.27	4	101.083
Aislamiento	507.5	5.286	4	21.145
Tarjetas de adquisición tipo NI9203	618	6.4375	4	25.75
Tarjetas de adquisición tipo NI9219	5028	52.375	4	209.5
Fuente de alimentación	184	1.9167	4	7.667
Cuadro de interruptores	620	6.4583	4	25.8334
Termopares	465	4.8437	4	19.375
Medidor de presión	160	1.667	4	6.667
Caudalímetro	280	2.9167	4	11.667
Ordenador portátil Lenovo	459	4.7812	4	19.125
Software (Matlab+Labview)	1064	11.0834	4	44.33
<b>Coste total</b>				<b>2634.1278</b>

Una vez calculados tanto el coste total de personal como el coste total de materiales utilizado, el coste total de este TFG se muestra en la Tabla 4 expresado en euros:

**Tabla 4. Coste total**

Tipo	Coste
Coste de personal	10712
Coste de material	2634.12
<b>Coste total</b>	<b>13346.1278</b>

## 1.5 Estructura de la memoria

El presente documento está formado por siete capítulos cuyo contenido se explica a continuación.

*El Capítulo 2* recoge un análisis sobre la necesidad de utilización de las energías renovables explicando brevemente cada una de ellas. Además incluye un estudio del desarrollo de dichas energías en España comentando brevemente sus ventajas e inconvenientes a la hora de ser aplicadas. Por último, recoge una breve explicación sobre las centrales térmicas solares, en el que se incluyen los distintos tipos y elementos que las componen, haciendo hincapié en las centrales de torre que serán la base de estudio de este proyecto.

En el *Capítulo 3* se realiza una descripción del proyecto y una explicación detallada de la instalación utilizada para la simulación, diferenciando tres bloques principales en ella y en los cuales se presentan por separado cada uno de los elementos que componen la instalación, así como sus modelos y propiedades.

En el *Capítulo 4* se desarrolla el estudio del proyecto mostrando los datos de temperaturas y flujos de calor recogidos en cada prueba de análisis, tanto en el momento de uso exclusivo de la placa como durante la circulación de las sales dentro de la instalación. Además se muestran unas imágenes que explican la transferencia de calor producida dentro del material utilizado.

El *Capítulo 5* recoge las conclusiones y análisis de los resultados más significativos.

El *Capítulo 6* recoge la bibliografía detallada de toda la información utilizada para la realización de este documento.

Finalmente, el *Capítulo 7* recoge los manuales necesarios para la puesta en marcha y apagado de la instalación, así como el modo de respuesta en caso de fallo.

## Capítulo 2. Estado del arte

En este capítulo se realiza un análisis sobre el cambio climático que se está produciendo en todo el mundo, debido a la utilización de combustibles fósiles para la generación de energía y la necesidad de utilizar energías renovables como sustitutivo, explicando brevemente cada una de ellas. Además se presentarán datos sobre el estado de las energías renovables en España y sobre las reservas de combustibles fósiles disponibles.

Finalmente, se realiza una explicación de los tipos de centrales termosolares, ya que son el objetivo de estudio de este proyecto.

### 2.1. Los combustibles fósiles y el cambio climático

Los combustibles fósiles son el carbón, el crudo y el gas natural.

Los combustibles fósiles son la fuente de energía primaria más utilizada a nivel mundial. En España suponen el 70% de la energía primaria total: el 40% corresponde al petróleo, el 20% al gas natural y el 10% restante al carbón. También representan el mayor porcentaje de la energía final consumida en España, ya que en 2017 el consumo de productos petrolíferos supuso aproximadamente el 50%. [3]

Sin embargo, la combustión de combustibles fósiles es la principal fuente de emisiones contaminantes, pues genera cenizas y humos que contienen:

- $\text{CO}_2$  : principal causante del efecto invernadero.
- $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ : causantes de la lluvia ácida.

#### Petróleo

El petróleo es un combustible fósil formado por la descomposición de materia orgánica. Su poder calorífico se indica en la Tabla 5 y presenta mayor poder contaminante que el gas natural pero menor que el carbón.

A nivel mundial, el petróleo es la fuente de energía primaria más consumida pues representa el 50% del consumo de energía primaria mundial y es, también, el combustible fósil mundialmente más consumido. [4]

Tabla 5. Poderes caloríficos aproximados de los combustibles fósiles [5][6]

Elemento		Poder calorífico (MJ/kg)
Petróleo		41,85
Gas Natural		50
Carbón	Antracita	33,47
	Hulla	29,30
	Lignito	25,10

En cuanto a las reservas de crudo, la mayor parte de estas se encuentra en países pertenecientes a la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo). Los países con mayores reservas de crudo son: Venezuela, que posee en torno al 17%, y Arabia Saudí que posee en torno al 15%.

En el año 2017, las reservas mundiales de crudo ascendían a 1700 miles de millones de barriles, lo que al ritmo de producción actual garantizaría el suministro durante alrededor de 50 años[7]. Sin embargo, este ratio se ha mantenido estable en los últimos años, lo que significa que siguen apareciendo nuevas reservas, principalmente gracias a la explotación de los denominados “yacimientos no convencionales” a través de técnicas como el “fracking”. En la explotación de este tipo de yacimientos destaca Estados Unidos.

A nivel mundial, el petróleo se utiliza mayoritariamente en el transporte, principalmente en el transporte por carretera con el uso de gasolinas y gasóleos.[5]

### Gas Natural

El gas natural es un combustible fósil de origen orgánico, por lo que puede encontrarse dentro de los yacimientos de petróleo o también puede hallarse de manera aislada. Se trata de un hidrocarburo formado por una mezcla de varios gases en proporciones variables, entre los cuales destaca principalmente el metano.[5] Al tener un poder calorífico menor que el petróleo, como se puede observar en la Tabla 5, y un menor efecto contaminante que el resto de combustibles fósiles, el gas natural se está convirtiendo en una de las principales fuentes de energía. Actualmente, supone aproximadamente el 24% de la energía primaria mundial.[8]

La mayor parte del consumo de gas natural, tanto a nivel nacional como mundial, se destina a usos residenciales, industriales y comerciales, por ejemplo en sistemas de calefacción o agua caliente sanitaria. Otro uso principal es la producción de electricidad en las centrales de ciclo combinado. En España, la potencia instalada de ciclo combinado es aproximadamente 26GW [3]. Se trata de una producción de electricidad variable debido al buen rendimiento a carga parcial que presentan este tipo de centrales. Por lo tanto, esta energía se utiliza como apoyo a la producción con renovables.

En cuanto a las reservas de gas natural son del orden de  $180\text{Tm}^3$ , lo que al ritmo de producción actual garantizaría el suministro durante unos 52 años. Oriente Medio controla el 40% de las reservas de gas natural, siendo Irán el país que más tiene, y las zonas de Europa y Eurasia controlan alrededor del 30%, destacando Rusia.

### **Carbón**

El carbón es un combustible fósil de origen vegetal, compuesto por carbono, agua, cenizas y materia volátil. Cuanto mayor sea su contenido en carbono mayor será su poder calorífico y menor su poder contaminante.

De entre todos los combustibles fósiles el carbón es el que presenta menor poder calorífico y mayor poder contaminante pero su uso sigue estando muy extendido al ser el de menor coste y del que mayores reservas existen a nivel mundial.

Las reservas mundiales de carbón actuales se sitúan en torno al millón de millones de toneladas, lo que al ritmo de producción actual garantizarían el suministro durante unos 153 años.

5 países controlan el 75% de las reservas mundiales y son además los principales productores mundiales de carbón: Estados Unidos, China, Australia, India y Rusia. Sin embargo, se observa como la producción de carbón se traslada principalmente a economías emergentes, como China o India [7].

En cuanto al carbón en España, la producción en 2016 superó las 2 millones de toneladas lo que supone un descenso de casi un millón de toneladas respecto de la producción de 2015 [8].

Una vez analizados los tres tipos de combustibles fósiles la conclusión que puede extraerse es que las reservas existentes se están agotando. Sumado al hecho de que la quema de combustibles fósiles es la principal causa mundial del cambio climático, hace que el panorama energético este cambiando en todo el mundo. Este cambio demuestra la necesidad de desarrollo de energías de bajas emisiones de  $\text{CO}_2$ , las cuales se vieron paralizadas en 2015 debido, principalmente, a una mejora del 1,8% de la intensidad energética de la economía mundial debido al uso de fuentes de energía limpias en todo el mundo.[9]

En términos generales, la energía renovable está experimentando un crecimiento muy acelerado, mientras que la demanda de petróleo disminuye y el uso del carbón se ve afectado por las nuevas políticas medioambientales. Sin embargo, el consumo de gas natural aumenta en un 50%, por lo que los combustibles fósiles seguirán siendo la base del sistema energético mundial durante décadas.

Para conseguir un cambio en el sistema energético mundial se llevó a cabo el Acuerdo de París sobre cambio climático, que entró en vigor en el año 2016. En este acuerdo se vieron involucradas naciones de todo el mundo cuyos objetivos generales consisten en reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y limitar el calentamiento a menos de 2°C. A partir de estos objetivos generales, cada país o continente concretan sus propias políticas, por ejemplo en la Unión Europea se fijó la ESTRATEGIA EUROPA 2020 [10]:

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20%, en comparación con los valores de 1990.
- Aumento de la producción con energías renovables en un 20%, con respecto a los valores de 1990.
- Mejora en un 20% de la eficiencia energética.

Además de por la estrategia Europa 2020, el futuro de los sistemas energéticos nacional y europeo vendrá marcado por el Marco sobre clima y energía para 2030 [7], que fija una serie de objetivos vinculantes e indicativos, tales como:

- Un objetivo vinculante de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40% para 2030, con respecto a los valores de 1990.
- Un objetivo vinculante de aumento de la producción con renovables en un 27% para 2030, con respecto a los valores de 1990.
- Un objetivo indicativo de mejora de la eficiencia energética en un 27% para 2030.

## 2.2. Las energías renovables

Las energías renovables se definen como aquellas que se producen o llegan de forma continua a la tierra y son inagotables. Una clasificación general es la que diferencia entre energías renovables para la producción de energía eléctrica y energías renovables de aprovechamiento térmico:

- Energías renovables de generación eléctrica: como la eólica, la hidroeléctrica, la fotovoltaica y la termoeléctrica.
- Energías renovables de aprovechamiento térmico: como la solar térmica, la biomasa, el biogás y los biocarburantes.

Las renovables se postulan como la principal alternativa al consumo de combustibles fósiles en la lucha contra el cambio climático ya que presentan dos grandes ventajas:

- Contribuyen eficazmente a la reducción de gases de efecto invernadero.
- Permiten una mayor utilización de los recursos autóctonos, lo que reduce la dependencia energética de los recursos procedentes del exterior y permite la diversificación en las fuentes de energía utilizadas.

Por el contrario, su principal desventaja es su falta de gestionabilidad, ya que la producción de energía mediante fuentes renovables depende de la disponibilidad del recurso energético en cuestión. Por lo tanto, mientras no se desarrollen sistemas para el almacenamiento de la energía producida en grandes cantidades, es necesario disponer de otras fuentes de energía para la producción en base (nuclear, gas o carbón), en los períodos en los que los recursos renovables no estén disponibles o no sean suficientes para satisfacer la demanda total de energía.

### **2.2.1. Energía eólica**

La energía eólica es la que aprovecha la fuerza del viento para la producción de energía eléctrica mediante aerogeneradores. Se distinguen dos tipos principales de aerogeneradores: los de eje vertical y los de eje horizontal, que son los más utilizados y eficientes.

Los componentes básicos de un aerogenerador son:

- El rotor: es la parte delantera y está formado por el buje, acoplado al eje de baja velocidad, y las palas que generalmente son tres y convergen en el buje.
- La góndola: es la parte central del aerogenerador. Consiste en una estructura de acero que contiene al generador eléctrico y a los equipos de orientación, control, comunicaciones y freno.
- La torre: suele ser tubular y soporta al rotor y a la góndola.

Actualmente, la potencia eólica instalada a nivel mundial supera los 500 GW y produce aproximadamente el 4% de la energía mundial. Se espera que la capacidad mundial instalada supere los 700 GW para el año 2020, siendo China y Estados Unidos los líderes mundiales. [11]

Cabe destacar el desarrollo de instalaciones offshore, en emplazamientos marinos, donde el viento tiene más fuerza y permite una mayor generación de energía.

En España, la capacidad instalada ronda los 23 GW y se concentra principalmente en las Comunidades Autónomas de Castilla y León, Castilla la Mancha y Galicia. [3]

### 2.2.2. Energía hidráulica

La energía hidráulica o hidroeléctrica es aquella que aprovecha la energía de los saltos de agua para la generación de electricidad. El agua, al caer, mueve una turbina que genera energía mecánica la cual es transformada en electricidad mediante un generador eléctrico.

Se trata de una tecnología madura y fiable, totalmente renovable, que no genera residuos y que presenta bajos costes de mantenimiento y de operación.

Se distinguen dos tipos principales de centrales hidroeléctricas:

- Centrales de agua fluyente: captan parte del caudal de un río haciéndolo pasar por una turbina para después devolver el agua a su cauce. Normalmente se utilizan para minihidráulica, es decir, en centrales de potencia inferior a los 10 MW.
- Centrales a pie de presa: aprovechan el agua de los embalses y suelen ser de mayor potencia que las anteriores. Su principal ventaja frente a las de agua fluyente es que permiten almacenar el agua, pudiendo utilizarla cuando sea necesario, reduciendo la dependencia del recurso. Por ello, este tipo de instalaciones se utilizan para regular el sistema eléctrico, equilibrando la oferta y la demanda de energía.

Actualmente, la energía hidroeléctrica es la fuente de energía renovable más utilizada en el mundo, produciendo alrededor del 17% de la electricidad mundial, con 1200 GW instalados en todo el mundo. [3]

Los líderes en capacidad instalada a nivel mundial son China y Estados Unidos.

La capacidad instalada en España está en torno a los 20 GW [3] y las Comunidades Autónomas con mayor producción son Castilla y León, Cataluña y Galicia.

### 2.2.3. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica permite convertir la radiación solar en electricidad gracias al efecto fotoeléctrico, que se produce al incidir la radiación solar sobre materiales semiconductores como el silicio o el germanio.

Se trata de una tecnología simple, de bajo mantenimiento y que acerca la producción de energía eléctrica a los consumidores permitiéndoles el autoconsumo.

Los elementos básicos de una instalación fotovoltaica son los siguientes:

- Células fotovoltaicas: sobre ellas incide la radiación solar produciendo el mencionado efecto fotoeléctrico, dando lugar a una corriente eléctrica continua. En función del material empleado las células presentarán distinto rendimiento y



coste. Se distingue entre células de silicio monocristalino (las más eficientes, en torno al 20%, y de mayor coste), de silicio policristalino (de eficiencia y coste medio) y las de silicio amorfo (su eficiencia no alcanza el 10% y son las más baratas).

- Placas fotovoltaicas: resultan de la asociación de células en serie o paralelo.
- Inversor: transforma la corriente continua en alterna.
- Seguidores: orientan las placas fotovoltaicas para captar la mayor radiación solar posible. Pueden ser de uno o dos ejes.

La potencia instalada de solar fotovoltaica a nivel mundial es de alrededor de 300 GW y se espera que supere los 400 GW para 2020. [12] La región de Asia-Pacífico es la zona con mayor capacidad instalada, con casi la mitad de toda la capacidad mundial.

En España, la capacidad de fotovoltaica instalada ronda los 4 GW y se ha mantenido estable en los últimos años[3]. Por Comunidades Autónomas destacan Navarra, Andalucía, Comunidad Valenciana y Castilla y León.

Nuestro país cuenta con grandes centros de I+D+i, como el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), donde se investigan nuevos desarrollos para la integración arquitectónica y urbanística como los pavimentos solares o los vidrios fotovoltaicos. Las líneas de investigación desarrolladas, tanto a nivel nacional como internacional, han permitido reducir significativamente los costes de generación con fotovoltaica en los últimos años.

## 2.2.4. Biomasa

Según la Especificación Técnica Europea (CEN/TS 14588) se define biomasa como “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”.

Las principales fuentes de biomasa son:

- Residuos forestales procedentes de podas y limpiezas.
- Residuos industriales procedentes de la industria alimenticia o de los lodos de depuradoras.
- Residuos agrícolas y ganaderos.
- Residuos sólidos urbanos (RSU)

Dentro de la biomasa o bioenergía se distinguen dos categorías principales: la tradicional y la moderna. La bioenergía tradicional se basa en la combustión de biomasa principalmente, mientras que la bioenergía moderna engloba a los biocombustibles y al biogás.

La bioenergía, en su conjunto, representa en torno al 10% del consumo mundial de energía final [13] y alrededor del 9% de la energía primaria producida a nivel mundial. Por su parte, la biomasa moderna es una de las principales fuentes de energía renovable, ya que su contribución total es cinco veces superior a la de la energía solar o la eólica.[14]

En España, la principal fuente de biomasa es la forestal y su principal uso es la generación de energía térmica mediante su combustión, aunque también puede emplearse para la generación de electricidad, ya que la capacidad instalada es de 1GW. Destacan las Comunidades Autónomas de Galicia, Castilla y León y Andalucía.

En cuanto a los biocarburantes o biocombustibles, estos son combustibles de origen biológico obtenidos mayoritariamente a partir de especies vegetales en cultivos energéticos y utilizados en motores de combustión interna para sustituir a la gasolina o al gasóleo, bien de manera total o utilizados como aditivos en la mezcla. Actualmente existen dos grandes tipos de biocarburantes:

- El bioetanol, sustitutivo de la gasolina, obtenido a partir de azúcares contenidos en diversas plantas como la remolacha o la caña de azúcar.
- El biodiesel, sustitutivo del diésel, obtenido a partir de aceites vegetales de gran acidez, como el de soja o colza, o a partir de aceites de fritura.

Los biocombustibles se postulan como una gran alternativa a los combustibles tradicionales ya que, en el año 2016, permitieron cubrir el 4% de la demanda mundial de combustibles para el transporte por carretera. Estados Unidos y Brasil son los principales productores de este tipo de combustibles [14].

Por su parte el biogás se obtiene del metano derivado de la descomposición anaeróbica de residuos sólidos urbanos en los vertederos. En España, la potencia instalada de biogás para la producción de electricidad está en torno a los 200 MW y cabe destacar la central de Valdemíngomez que obtiene el metano que yace en el vertedero del mismo nombre.

## **2.2.5. Energía termosolar**

La energía termosolar se basa en la captación de la radiación solar, concentrándola en una determinada superficie para el calentamiento de un fluido caloportador que después se utilizará para producir energía eléctrica o energía térmica, distinguiéndose entre energía solar termoeléctrica y energía solar térmica respectivamente.

### **2.2.5.1. Energía solar termoeléctrica**

La energía solar termoeléctrica se basa en la captación de la radiación solar para calentar un fluido a muy altas temperaturas para después utilizarlo para la generación de electricidad a través de un ciclo termodinámico de producción de potencia. Para que

dicho ciclo tenga una eficiencia aceptable se necesita alcanzar un alto grado de temperatura, lo que implica el uso de concentración solar, distinguiéndose dos tipos: lineal y puntual.

### **Concentración lineal**

Los captadores con concentración lineal disponen de movimiento de elevación en un solo eje. Se distinguen lo siguientes:

- **Concentrador cilindro-parabólico:** consiste en un reflector de vidrio y plata o metálico que concentra la radiación en un tubo metálico por cuyo interior circula un fluido caloportador, normalmente aceite térmico, consiguiendo un rendimiento eléctrico del 16%. Actualmente, el uso de sales fundidas como fluido caloportador se encuentra en estudio pero permitiría aumentar el rendimiento hasta el 20%.



**Figura 2. Colector cilindro-parabólico [15]**

- Concentrador lineal Fresnel: consiste en una serie de espejos planos horizontales y giratorios que concentran la radiación solar en un tubo de vacío estacionario situado a varios metros de altura, por el que circula un aceite térmico. Una de las mayores plantas a nivel mundial con esta tecnología es la de Puerto Errado II, en Calasparra (Región de Murcia).



**Figura 3. Concentrador lineal Fresnel [16]**

### Concentración puntual

Los captadores con concentración puntual disponen de movimiento en dos ejes. Se distinguen los siguientes:

- Plato parabólico: el plato concentra la radiación en un foco que va directamente conectado a un motor Stirling. Es la tecnología que más concentración consigue. Sin embargo, el motor en el foco impide el almacenamiento. En este caso, el fluido caloportador suele ser helio o hidrógeno.



Figura 4. Concentrador disco parabólico [17]

- Central de Torre: está formada por un campo de helióstatos que siguen la radiación solar en todo momento y la concentran en un foco colocado en lo alto de una torre.





Figura 5. Concentrador de torre [17]

Una vez conocidos los tipos de concentradores, se analizan los dos tipos de centrales eléctricas termosolares que existen en España: centrales de canales parabólicos y centrales de torre.

### Centrales de canales parabólicos

Este tipo de centrales utilizan concentradores cilindro-parabólicos para calentar un aceite térmico hasta los  $400^{\circ}\text{C}$ , tal y como indica la Figura 6. Dicho fluido se utiliza para producir vapor de agua, que después será turbinado para la producción de potencia en un ciclo Rankine, y para calentar un tanque de sales. El almacenamiento en sales permite eliminar la dependencia del recurso energético y seguir produciendo energía en las horas de oscuridad. Además, la instalación cuenta con un quemador auxiliar de gas natural en caso de que el calor almacenado en las sales no sea suficiente.

El aceite térmico utilizado no se congela, ni hierve pero es costoso, tóxico e inflamable, lo que lo hace incompatible con zonas urbanas.

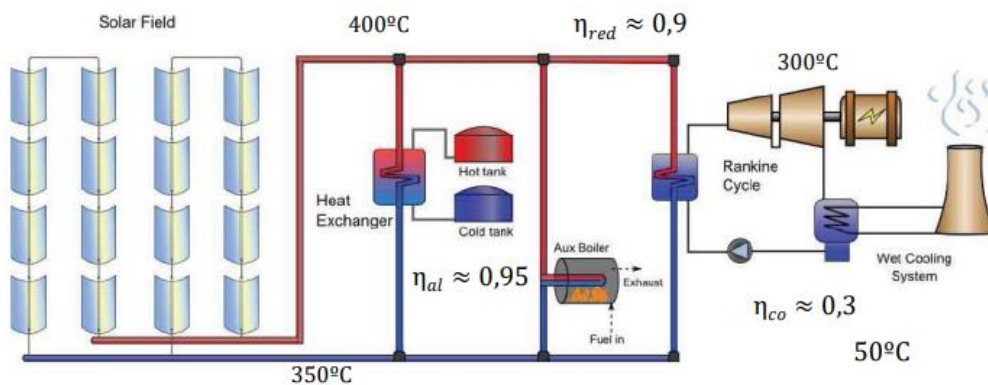


Figura 6. Configuración de central de canales parabólicos [18]

El 90% de las centrales solares termoeléctricas españolas son de este tipo, un ejemplo es la planta de Andasol en Granada.

### Centrales de torre

Los helióstatos concentran la radiación solar en el foco situado en lo alto de la torre. En esta configuración se utilizan sales fundidas como fluido caloportador. Dichas sales se utilizan para la producción de vapor que después será turbinado en un ciclo Rankine.

El uso de sales permite una mayor capacidad de transferencia de calor y almacenamiento pero hay que evitar su solidificación, que se produce a 230°C, por lo que es necesario controlar su enfriamiento por la noche.

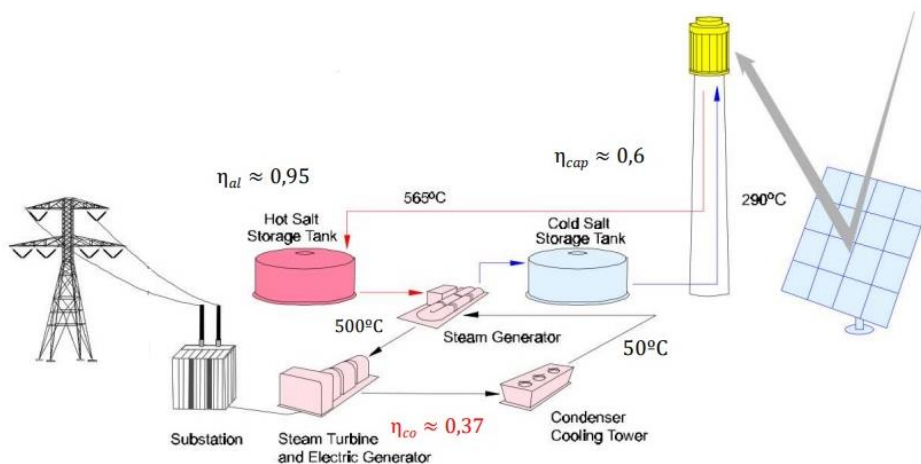


Figura 7. Configuración de central de torre [18]

España es líder en energía solar termoeléctrica, pues cuenta con, aproximadamente, la mitad de la potencia instalada a nivel mundial es decir, 2,3 GW [3]. Esto ha hecho que empresas españolas hayan podido ganar importantes contratos en el exterior como las

centrales de Solana y Mojave en Estados Unidos, ambas construidas por Abengoa y hoy propiedad de Atlantica Yield.

### 2.2.5.2. Energía solar térmica

La energía solar térmica se basa en la captación de la radiación solar para transformarla en energía térmica aprovechable. Se puede utilizar para el calentamiento de fluidos en sistemas de calefacción y en procesos industriales, como la refrigeración de la máquina de absorción. Su principal aplicación, actualmente, consiste en la producción de agua caliente sanitaria de uso doméstico. Las instalaciones de este tipo se componen de tres subsistemas:

- Subsistema de captación: se basa en un colector solar plano que capta la radiación y la transfiere al fluido que circula por su interior.
- Subsistema de intercambio: este subsistema es necesario en las instalaciones denominadas de circuito cerrado, donde el fluido caloportador sea distinto al que recibe el usuario. Por ello, es necesario instalar un intercambiador de calor entre el fluido y el agua de consumo.
- Subsistema de almacenamiento: consiste en depósitos en los que se almacena el agua caliente.

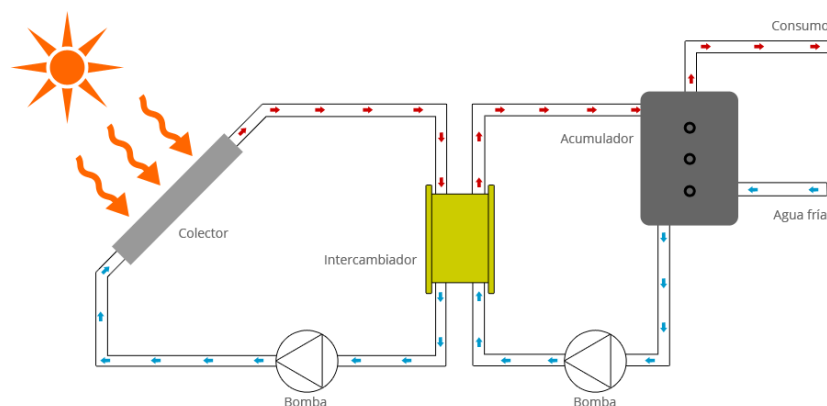


Figura 8. Esquema de una instalación de energía solar térmica [19]

El desarrollo de esta tecnología en España se vio muy influido por la modificación del Código Técnico de la Edificación [20], en el año 2007, que establecía la obligación de cubrir entre el 30 y el 70% de la demanda de ACS en edificios rehabilitados o de nueva construcción. Actualmente, la potencia instalada en España ronda los 2,3 GWth [3]. Por Comunidades Autónomas destacan Andalucía, Cataluña y Comunidad de Madrid.



## Capítulo 3. Descripción del proyecto

El desarrollo de este Trabajo Fin de Grado forma parte de un estudio de eficiencia y mejora de receptores de centrales solares, llevado a cabo por el Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid. Este se basa, como ya se ha explicado anteriormente, en el estudio de las centrales térmicas de torre, haciendo especial hincapié en la distribución de temperaturas que sufre el receptor externo para conseguir una mejora en su eficiencia y obtener un funcionamiento fiable del mismo.

Principalmente, se estudió el funcionamiento de las centrales térmicas solares de torre para conocer sus ventajas e inconvenientes y saber cuáles son los elementos más débiles de la instalación para poder realizar un análisis y conseguir unas mejoras futuras. De esta manera se conoce que el receptor exterior es uno de los elementos que más sufre de toda la instalación y por lo tanto es una parte importante del estudio de la eficiencia de las centrales, ya que si se consigue que el receptor soporte menores esfuerzos de fatiga se conseguirá, en la medida de lo posible, aumentar la eficiencia del conjunto de la central.

Como se ha explicado anteriormente, los receptores de tipo exterior están formados por un conjunto de tubos expuestos a la radiación solar, la cual es absorbida y transmitida por conducción a través de la pared de la tubería y por convección forzada al fluido caloportador. El problema radica en que la radiación solar solo se absorbe a través de la cara frontal de los tubos, mientras que el resto de la superficie tiene un comportamiento prácticamente adiabático y además, el flujo de calor no es uniforme alcanzando valores de hasta  $1\text{MW/m}^2$ . Esto provoca que la distribución de temperaturas en toda la superficie del tubo no sea uniforme, lo que da lugar a estrés térmico y que la estructura del tubo flexione. Es decir, reduce su vida útil. Teniendo en cuenta que el receptor es uno de los elementos más caros de la central, es importante llevar a cabo un estudio de diseño de los tubos para aumentar su vida útil y conseguir un descenso en el coste total de la central térmica.[21] [22]

En este proyecto no se realiza un estudio completo del receptor de tubos sino que se ha realizado una modelización para el estudio de un único tubo portador de sales. Además, previamente se analiza el flujo de calor que absorbe una placa plana de 3mm de espesor del mismo material que el tubo de la instalación, es decir, de acero inoxidable 304. El objetivo es justificar el calor que incide en un diferencial de superficie del tubo y extrapolarlo a toda la superficie una vez se ha alcanzado el estado estacionario.

### 3.1 Descripción de la instalación

La realización de este proyecto se ha llevado a cabo teniendo en cuenta las medidas experimentales obtenidas a través de la construcción, en el taller del Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos de la Universidad Carlos III, de una instalación que simula el desarrollo del flujo de calor a través de las sales fundidas que circulan por el interior de los tubos del receptor. Por esta razón, es de vital importancia la explicación y el completo conocimiento de dicha instalación para su correcto uso y análisis.

Para una correcta explicación de la instalación dividiremos esta en cuatro bloques principales que son: el circuito de sales, el circuito de refrigeración, el sistema de adquisición de datos y el sistema de control.

#### 3.1.1 Circuito de sales

Esta parte de la instalación consiste en el diseño de un circuito cerrado en el cual las sales, impulsadas por una bomba, se desplazan desde el depósito de almacenamiento hasta alcanzar la altura del tubo y volver, a través de este, a la posición de inicio, es decir, al depósito.



Figura 9. Elementos del circuito de sales

A continuación se explican los distintos elementos que se aprecian en la Figura 9:

#### Depósito de almacenamiento:

Consiste en un tanque de forma cilíndrica de acero inoxidable 304 y cuya capacidad es de 600 litros. En su interior se encuentra una bomba de alta temperatura que provoca que las sales, una vez calentadas gracias a las resistencias colocadas en la superficie del

depósito, alcancen la altura necesaria para desplazarse por el interior del tubo. La temperatura de su interior se controla para que se mantenga entre 300°C y 500°C. [22]

El modelo seleccionado para la bomba es GVSO 40/250 de la marca Friatec que es capaz de bombear hasta 28kg/s. Además, el caudal que bombea puede ser regulado con un variador de frecuencia para que las sales siempre se desplacen con números de Reynolds entre 20000 y 100000<sup>1</sup>.

### Tubo receptor:

Este está fabricado con acero inoxidable 304 y sus dimensiones geométricas son de 5,2cm de diámetro interior y 4mm de espesor. Está rodeado en su superficie por calentadores eléctricos y envuelto con aislante en todo el lazo exceptuando la zona de análisis, donde se coloca la bobina[23][22]

El tubo está colocado con una cierta inclinación hacia el depósito para que así, en el momento de finalización de la simulación, las sales vuelvan por inercia al depósito y no se enfríen dentro del tubo evitando así taponamientos y posibles costes imprevistos.

Tanto el tubo receptor como el depósito de almacenamiento están recubiertos por una capa de aislante de 20mm de espesor para reducir las pérdidas de calor por convección a través del acero. El material de aislamiento es lana de roca que como se puede ver en la Figura 10 presenta una baja conductividad térmica y puede soportar temperaturas elevadas del orden de 750°C. [24]

Basic features of the commonly met insulating materials, current state of the art

Main physical features	Material				
	Glass wool	Stone wool	Extruded polystyrene	Expanded polystyrene	Polyurethane foam
Density (kg/m <sup>3</sup> )					
Minimum	13	30	20	18	30
Maximum	100	180	80	50	80
Thermal conductivity factor, $\lambda$ (W/m K)					
Minimum	0.030	0.033	0.025	0.029	0.020
Maximum	0.045	0.045	0.035	0.041	0.027
Temperature application range (°C)					
Minimum	-100	-100	-60	-80	-50
Maximum	500	750	75	80	120
Resistance to vapour diffusion factor					
Minimum	<1	<1	80	25	50
Maximum	1	1	200	200	>100
Humidity assimilation rate (at 23 °C/80% RH)					
Minimum	<0.1	<0.1	<1 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
Maximum	1	1.5			
Reaction to fire class					
Minimum	A1	A1	B1	B1	B1
Maximum	A2	A2	B2	B2	B2

Figura 10. Propiedades de la lana de roca[24]

<sup>1</sup> Éstos valores del número de Reynolds corresponden a esta instalación en particular trabajando a las velocidades máximas a las que trabajan los receptores externos de las centrales reales.[23]

**Inductor:**

Para simular la radiación que absorbe el tubo receptor de los heliostatos en las instalaciones reales se utiliza un inductor que solamente incide potencia sobre el tubo receptor en la superficie que está en contacto con la bobina, es decir, su cara frontal dejando así que el resto de la superficie del tubo no reciba potencia directamente del inductor, justo como ocurre con la radiación solar en la realidad. [22]

Cuando una corriente alterna se aplica al primario de un transformador, éste genera un campo electromagnético. El calentamiento por inducción es una aplicación directa de la ley de Faraday que enuncia que si el secundario del transformador está situado en el interior del campo magnético se inducirá corriente eléctrica. En una configuración simple de calentamiento de inducción, como podría ser esta, una fuente de alimentación, que en este caso sería la bobina de cobre, genera una corriente alterna que atraviesa el inductor y la pieza a calentar, en este caso el tubo receptor, se coloca dentro de dicho inductor. El inductor actúa como elemento primario del transformador mientras que el tubo receptor actuaría como secundario. Además, siendo el tubo receptor de un material conductor cuando éste es atravesado por el campo magnético se inducen las llamadas corrientes de Foucault en la pieza a calentar.[25]

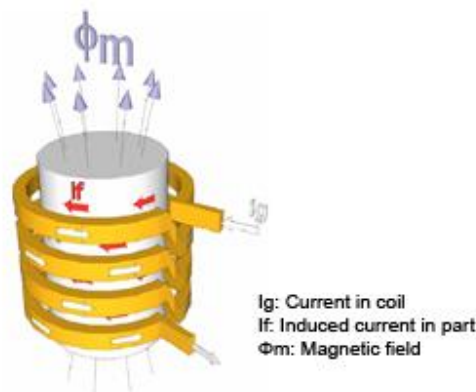


Figura 11.Principios del calentamiento por inducción[25]

De este modo y tal y como se muestra en la Figura 11, el modo de fluir de las corrientes de Foucault generan un calor localizado sin contacto directo entre el inductor y el tubo receptor. Por lo tanto, se elige el método de calentamiento por inducción debido a su alta productividad ya que pueden alcanzarse altas temperaturas de forma instantánea. Además, como este método de calentamiento sólo afecta a materiales metálicos se aseguraría que no hay influencia en el fluido caloportador que se desplaza por el interior del tubo y, además, la eficiencia energética es elevada ya que convierte la energía electromagnética de la bobina en calor útil en hasta un 90%.[26]

El modelo de inductor utilizado en la instalación es Sinac 6 SH de 350kHz compuesto de un convertidor de frecuencia colocado en un armario cerrado y una estación de

calentamiento externa donde se encuentra la bobina de inducción. El inductor se maneja a través de un panel de control en el cual se pueden especificar distintas curvas de calentamiento a distintos niveles de potencia. La bobina utilizada es de inducción rectangular con unas medidas de 100mm x 10mm la cual a la hora de realizar los análisis se sitúa a 8mm de distancia de la superficie del tubo receptor.

### Fluido caloportador:

Para el análisis de este proyecto se utilizan 400g de sales solares (60%NANO<sub>3</sub> – 40%KNO<sub>3</sub>) , éstas deben mantenerse en intervalos de temperatura entre 300-600°C para que no se congelen y solidifiquen.[22]

En cuanto a las propiedades físicas de estas sales no son homogéneas, es decir, dependen de la temperatura (T) a la que se encuentren:

$$\rho = 2090 - 0.636T \quad (1)$$

$$k = 0.443 + 1.9e - 4T \quad (2)$$

$$\mu = 0.022714 - 1.20e - 4T + 2.21e - 7T^2 - 1.474e - 10T^3 \quad (3)$$

Donde:

$\rho$  es la densidad de las sales medida en kg/m<sup>3</sup>

$k$  es la conductividad térmica de las sales medida en W/mK

$\mu$  es la viscosidad de las sales medida en Ns/m<sup>2</sup>

$T$  es la temperatura a la que se encuentran las sales en °C

Sin embargo, las propiedades termodinámicas sí presentan unos valores prácticamente constantes durante todo el intervalo de temperaturas alcanzado por las sales y se muestran en la Tabla 6:

Tabla 6. Propiedades físicas de las sales[27]

Propiedad	Valor	Unidad de medida
Calor latente (Hf)	97	KJ/kg
Calor específico (Cp)	1520	J/kgK

### 3.1.2 Circuito de refrigeración

Éste es necesario para evitar el sobrecalentamiento de todos los elementos que forman la instalación en especial de la bobina. Para ello es necesario el diseño de un ciclo de refrigeración cuyo fluido de trabajo es agua y se compone de tres elementos que se explican a continuación.



Figura 12. Circuito de refrigeración

#### Bomba auxiliar:

Las indicaciones técnicas del inductor exigen un caudal mínimo de 70dl/min por lo que se requería la instalación de una bomba auxiliar. En este proyecto el modelo elegido es una bomba Wilo MHIL 107EM consiguiendo así un caudal que varía entre los 80dl/min y los 85dl/min. Es de vital importancia que la bomba auxiliar se active antes que el inductor ya que por el contrario le llegaría caudal procedente del Sinac antes de que hubiese comenzado a bombear agua y se dañaría.



### **Máquina de refrigeración:**

Consiste en una máquina de aire acondicionado modelo Daikin EWAQ005, destinada para uso doméstico por lo que su funcionamiento consiste en recibir el caudal caliente procedente de inductor y, a través de su ciclo, reducir su temperatura teniendo en cuenta las condiciones de diseño. Según la ficha técnica, el agua de refrigeración no puede llegar a congelarse nunca sino que debe estar dentro del intervalo de valores comprendido entre 5°C y 35°C.

Se debe tener en cuenta también que la bomba ha de ser activada justo después de la máquina de refrigeración o por el contrario esta última fallaría por una falta de suministro de caudal en ella.

### **Depósito auxiliar:**

Hubo la necesidad de instalar otro depósito entre la bomba auxiliar y la propia bomba de la máquina de refrigeración para asegurar el constante suministro de fluido.

## **3.1.3 Sistema de adquisición de datos**

Para el correcto análisis de los resultados y para controlar las condiciones de temperatura y presión a las que deben estar las sales fundidas se han utilizado los siguientes elementos:

### **Termopares:**

Para realizar un estudio exhaustivo de las temperaturas a lo largo de todo el lazo se estudió la utilización de diferentes tipos de sensores pero finalmente se decidió instalar termopares, los cuales consisten en dos metales diferentes unidos por uno extremo. Cuando la unión de los metales varía su temperatura se produce un voltaje que se relaciona con la temperatura alcanzada en esa unión.

En cuanto a los tipos de termopar, existen diferentes configuraciones según sus calibraciones, las más comunes son las tipo J, K, T y E. Entre ellas se distinguen debido a diferentes rangos de temperatura aunque la máxima temperatura posible que pueden detectar varía según el diámetro del alambre del termopar, es decir, un termopar cuyo alambre sea muy fino posiblemente no alcance todo el rango de temperaturas. [28]

Common Thermocouple Temperature Ranges			
Calibration	Temp Range	Std. Limits of Error	Spec. Limits of Error
<b>J</b>	0°C to 750°C (32°F to 1382°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
<b>K</b>	-200°C to 1250°C (-328°F to 2282°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
<b>E</b>	-200°C to 900°C (-328°F to 1652°F)	Greater of 1.7°C or 0.5%	Greater of 1.0°C or 0.4%
<b>T</b>	-250°C to 350°C (-328°F to 662°F)	Greater of 1.0°C or 0.75%	Greater of 0.5°C or 0.4%

Figura 13. Rangos y límites de error del termopar [28]

Siendo el rango de temperaturas de cada tipo de termopar el mostrado en la Figura 13 se deduce que la opción más apropiada para la medición de las temperaturas que se alcanzan en la instalación de este proyecto son los termopares tipo K.

Por lo tanto, a lo largo del tubo receptor, y en distintas posiciones circunferenciales, se han instalado termopares tipo K para realizar la medición de la variación de temperaturas tanto en la pared del tubo receptor como en el interior de éste, es decir, en el fluido caloportador tanto en el instante previo al paso del inductor como en el momento posterior.

Además, como se ha explicado anteriormente es de vital importancia mantener las sales fundidas y el fluido de refrigeración en unos intervalos de temperatura concretos para el correcto funcionamiento de la instalación por lo que se han colocado diversos termopares tipo K cuyo objetivo es el control de las temperaturas para detectar posibles pérdidas. Estos termopares están repartidos de la siguiente forma:

- Dentro del depósito de sales se han colocado cuatro termopares, de los cuales uno de ellos está colocado justo en la base y el resto están distribuidos en la pared de dicho tanque. De esta manera se consigue un control de la temperatura de las sales para mantenerlas siempre en el rango establecido en la descripción de este proyecto y para observar si se produce estratificación<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> La estratificación se produce en fluidos cuya densidad varía en función de la temperatura. Este efecto aparece cuando el calentamiento no se produce de forma uniforme y, como consecuencia, se generan canales de flujo de distinta temperatura. En este proyecto, como en el momento de parada de la instalación, es decir, cuando no se realicen experimentos, las sales estarán en reposo será inevitable que se produzca este fenómeno pero se deberá controlar que la zona más baja de temperatura no llegue a solidificar las sales. [32]



- En la unión del depósito de sales y el tubo receptor se ha soldado un termopar para medir la temperatura a la que regresan las sales al depósito una vez realizado el circuito, controlando que esta temperatura no supere los 550°C.
- En la zona donde está situado el caudalímetro se han colocado dos termopares, uno justo antes de llegar a él y otro inmediatamente después debido a que esta zona del tubo receptor no está prevista de aislamiento por lo que necesita un mayor control de las posibles pérdidas.
- En el circuito de refrigeración también es necesario realizar un control por lo que se ha colocado un termopar al inicio de este circuito y otro al final para medir la temperatura del fluido de refrigeración y poder estimar la cantidad de flujo de calor que le llega desde el inductor.

#### **Caudalímetro:**

Está situado en el tramo inferior del circuito de sales y se utiliza para medir el caudal de sales fundidas que circula por el interior del tubo receptor, el cual vendrá dado por el intervalo de valores de número de Reynolds que se quieren alcanzar, que en este caso se pretenden asemejar a una central térmica real como se ha comentado anteriormente.

#### **Medidor de presión:**

Está colocado justo a la salida del depósito de sales, en el tramo superior de la instalación. Sirve para controlar la presión a la que circulan las sales por el interior del tubo y comprobar así que no se esté produciendo solidificación. Si esto ocurriese habría que detener inmediatamente la simulación y corregir la velocidad a la que circulan las sales por el interior del tubo receptor.

#### **Resistencias térmicas:**

Como ya se ha explicado anteriormente, alrededor del depósito están colocadas unas resistencias térmicas con el objetivo de fundir las sales, en el caso de que estén en estado de solidificación, y de mantener su correcta temperatura una vez éstas se hayan fundido.

El control y programación de dichas resistencias se realiza a través de un software llamado iTools que permite programar el set point de las temperaturas del depósito tanto de la pared como del fluido.

#### **Variador de frecuencia:**

Como se ha comentado en la descripción de la bomba principal, es decir, la que está en el interior del depósito de sales, ésta lleva asociada un variador de frecuencia a través del cual se puede variar la velocidad de rotación del eje de la bomba, para así variar la cantidad de caudal de sales que circula por la instalación.

### **Tarjetas de adquisición de datos:**

De acuerdo con las explicaciones anteriores, las medidas de flujo y temperatura obtenidas son analizadas a través de un programa de flujo realizado a través de la aplicación Labview. Para obtener esas medidas se han utilizado tarjetas de adquisición de la marca *National Instruments*, las cuales están provistas de aislamiento para evitar interferencias entre los distintos canales y reducir el efecto del ruido electromagnético que provoca el inductor.

Por especificaciones del fabricante, se han utilizado dos tipos diferentes de tarjetas, uno para la toma de datos de los termopares y otro para la medida de presión del sensor.

Para los termopares se han utilizado las tarjetas tipo NI 9219 multimode las cuales, al tener diferentes canales aislados, permiten obtener diversas medidas de temperatura según el número de pines que se conecten. La manera de conectarlas al rack también está definida por el manual del fabricante, por lo que se ha de conectar la salida positiva del termopar al pin número 4 y la salida negativa al pin número 5. [29]

Respecto al sensor de presión, se han utilizado tarjetas tipo NI 9203, las cuales ofrecen valores de intensidad medidos en Amperios y que a través del software definido anteriormente se convertirán en valores de presión. Para que esta conversión se realice correctamente se ha de conectar el cable de salida de sensor a una fuente de alimentación modelo NI PS 14, también de la marca *National Instruments*, de la siguiente manera:

- El cable azul, es decir, el neutro se conecta con la terminal N
- El cable marrón correspondiente a la fase se conecta con la terminal L
- El cable verde se conecta con la terminal de tierra

Una vez conectado el cable de salida del sensor a la fuente de alimentación, ésta se ha de conectar a la tarjeta de adquisición de tal manera que el cable correspondiente al terminal positivo se conecta al pin AI0 y el negativo al terminal común.[30]

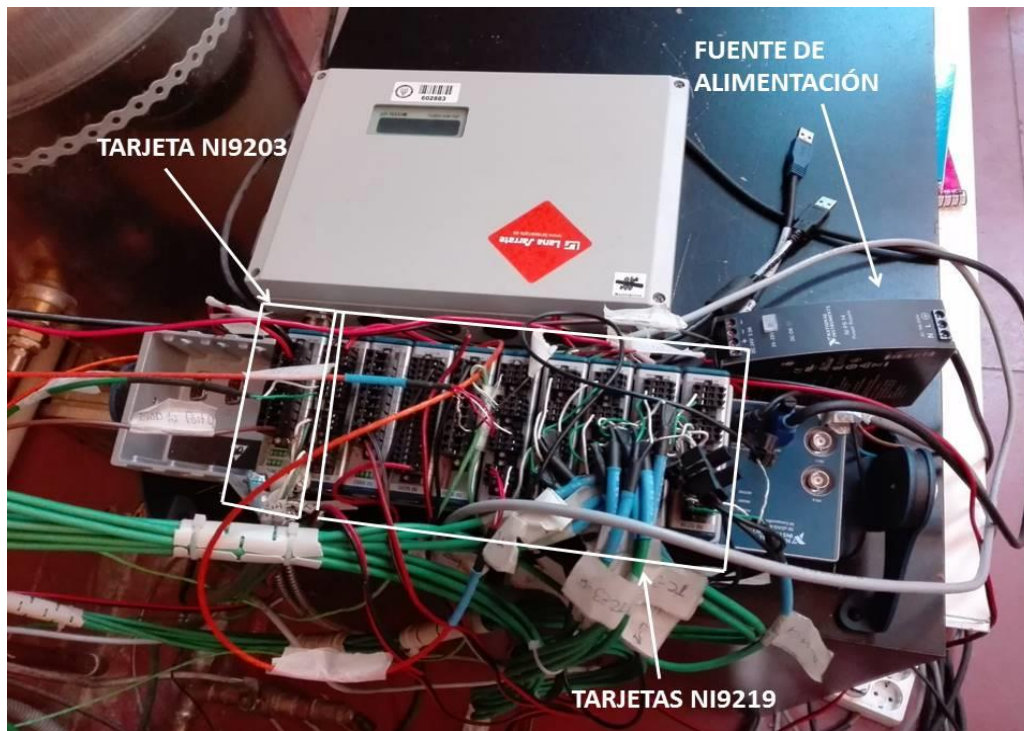


Figura 14. Tarjetas de adquisición

### 3.1.4 Sistema de control

Para el correcto desarrollo del proyecto se han de utilizar diferentes elementos para controlar la temperatura y presión del fluido caloportador y del fluido de refrigeración, para asegurar que cumplen los requisitos de análisis. Para ello, además de la utilización de sensores, caudalímetro y termopares, se han utilizado los siguientes elementos:

#### Sistema de traceado:

Como se ha explicado a lo largo de este documento, uno de los requisitos vitales es evitar que las sales que circulan por la instalación no se solidifiquen al entrar en contacto con las paredes del tubo y evitar, lo máximo posible, las pérdidas que puedan producirse a lo largo de su recorrido. Para ello se instaló un sistema de traceado eléctrico, que consiste en unos cables calefactores colocados en el interior de las tuberías, cuya función es precalentar dichas tuberías y mantener el fluido caloportador a la temperatura deseada durante todo el proceso, para así evitar su solidificación y la variación de la velocidad eliminando posibles bloqueos en el tubo receptor. Estos cables calefactores están introducidos en un dieléctrico que a su vez está cubierto por una capa metálica y generan calor por efecto Joule.

En este proyecto el sistema de traceado está dividido en dos tramos, uno de ellos abarca el tramo desde la salida del depósito de sales hasta la entrada en el tubo receptor, y el otro tramo abarca desde que termina el tubo receptor hasta la entrada, de nuevo, en el

depósito de sales. En el interior del tubo receptor no se ha colocado sistema de traceado para evitar posibles variaciones de calor en el fluido que puedan proporcionar un análisis erróneo de la simulación.

Además, cada tramo del traceado contiene una sonda PT100 y un termostato digital TCON-CSD/20 con un display para programar el setpoint y controlar así los intervalos de temperatura alcanzados. También se ha colocado una malla metálica para conseguir una transferencia de calor más uniforme y conseguir temperaturas más similares a lo largo de la pared del tubo.

### **Cuadro eléctrico:**

En él se encuentran los interruptores básicos necesarios para poner en marcha toda la instalación, tanto el circuito de sales como el de refrigeración. Los elementos que forman este cuadro eléctrico se detallan a continuación y se presentan esquematizados en la Figura 15:

1. Interruptor general: Es el interruptor principal del cuadro eléctrico, es decir, este debe estar accionado para permitir que todos los descritos a continuación puedan encenderse.
2. Cuadro de control de resistencias: Permite la puesta en marcha de las resistencias colocadas en el depósito de las sales.
3. Inductor: Es el interruptor que permite el suministro de corriente eléctrica al Sinac y por lo tanto el encargado de que se produzca calentamiento por inducción.
4. Variador del motor: Controla el estado del variador de frecuencia de la bomba.
5. Reserva y automático del traceado: Para que el sistema de traceado pueda ponerse en marcha es necesario que este interruptor esté accionado.
6. Máquina de aire acondicionado A/A: permite la puesta en marcha de la máquina de aire acondicionado del circuito de refrigeración
7. Bomba: este interruptor permite el encendido de la bomba auxiliar correspondiente al circuito de refrigeración. Es importante asegurarse que tanto el inductor como el convertidor de frecuencia están activados previamente para evitar posibles fallos en el correcto funcionamiento de la instalación.
8. Traceado: estos dos interruptores corresponden a la puesta en marcha del traceado de cada uno de los tramos del lazo.

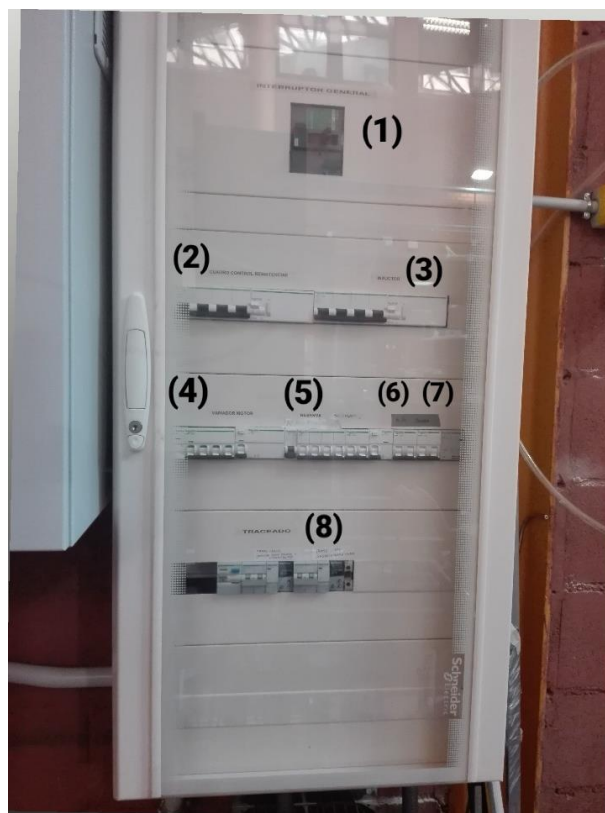


Figura 15. Cuadro eléctrico

## Capítulo 4. Medidas experimentales

A lo largo de este documento se han ido detallando las pautas seguidas para el diseño y desarrollo de la instalación que simula una central térmica de torre central y, como ya se ha especificado, una vez realizado el montaje y el total conocimiento del funcionamiento de dicha instalación, se procedió a la toma de medidas experimentales a través de los elementos físicos y el software detallados en el capítulo 4.

Para ello se realizaron dos tipos de medidas, una de ellas simplemente utilizando una placa y la otra con el circuito de sales en funcionamiento.

### 4.1 Mediciones en la placa

Previamente a la puesta en marcha del circuito de sales, se realizó un estudio de la transferencia de calor en una placa plana y lisa de acero inoxidable 304, a la cual se le colocó en la superficie en contacto con la bobina un sensor de flujo de tipo IHF0 y en su cara posterior un termopar tipo k, para medir la temperatura que se transfiere por su interior.

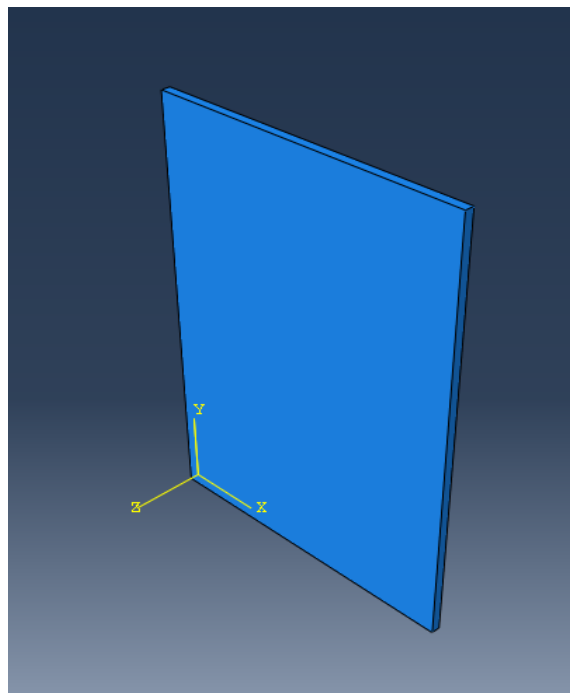


Figura 16. Simulación placa plana

Partiendo de la placa de la Figura 16, a través de la variación de temperatura medida en las distintas paredes de la placa, se podrá calcular el flujo real que se transfiere por el interior de esta a través de conducción en dirección del eje Z, y poder detectar las pérdidas de carga que se generan, del mismo modo, pero en direcciones del ejes X e Y.

Para conocer con mayor exactitud el flujo de calor que absorbe la placa, se obtuvieron medidas a distintas distancias de la bobina del inductor tal y como se muestra en la Figura 17:

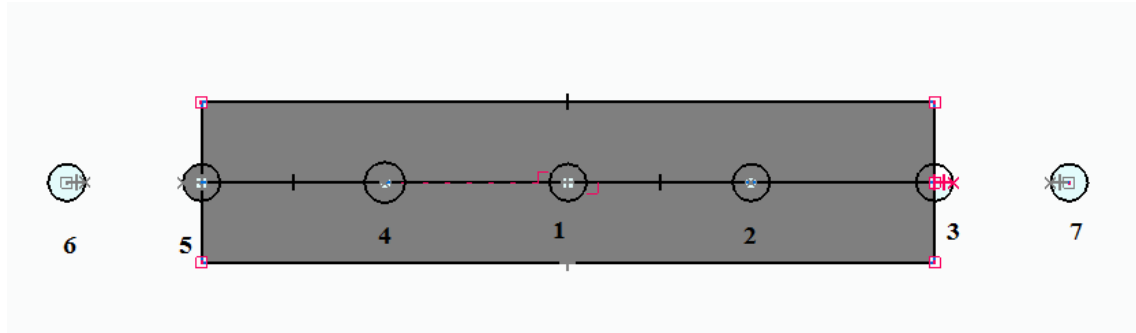


Figura 17. Esquema posiciones en la tabla

Para todas las posiciones de estudio se utilizaron valores de potencia en el Sinac de 10kW en intervalos de 15 minutos y la placa se colocó a una distancia de 8mm de la bobina, ya que si se colocaba a distancias menores los tornillos que sujetan el sensor alcanzaban rápidamente temperaturas muy altas y no mantenían alineado el sensor con la placa.

Para poder calcular el flujo de calor que se transfiere a través de la placa en su dirección transversal, es decir, en el eje Z según la Figura 16, es necesario conocer el coeficiente de transferencia de calor o conductividad térmica que presenta el acero inoxidable 304, que en este caso según la Figura 18 varía según la temperatura.[31]

Composición	Punto de fusión (K)	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K)									
		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg · K)	$k$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k$ (W/m · K)/ $c_p$ (J/kg · K)									
						100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Aceros inoxidables															
AISI 302		8055	480	15.1	3.91			17.3	20.0	22.8	25.4				
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95	9.2	12.6	16.6	19.8	22.6	25.4	28.0	31.7		
AISI 316		8238	468	13.4	3.48	272	402	515	557	582	611	640	682		
								15.2	18.3	21.3	24.2				
AISI 347		7978	480	14.2	3.71			504	550	576	602				
								15.8	18.9	21.9	24.7				
								513	559	585	606				

Figura 18. Propiedades termofísicas de sólidos metálicos



Una vez conocido el valor de la conductividad térmica se aplicará el principio de la transferencia de calor por conducción[31]:

$$q'' = \frac{\Delta T}{Rt} \quad (4)$$

$$Rt = \frac{e}{K} \quad (5)$$

Donde:

$q''$  es el flujo de calor que se transfiere a través de la placa

$\Delta T$  es la variación de temperaturas entre la obtenida por el sensor y la obtenida por el termopar

$R_t$  es la resistencia térmica por unidad de superficie

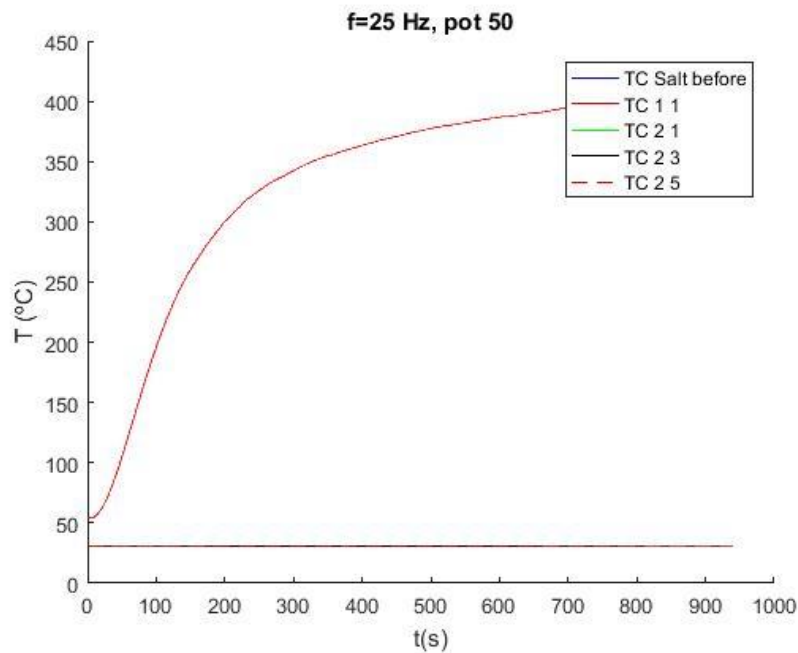
$e$  es el espesor de la placa de estudio medido en milímetros

$k$  es la conductividad térmica del material

### Posición 1:

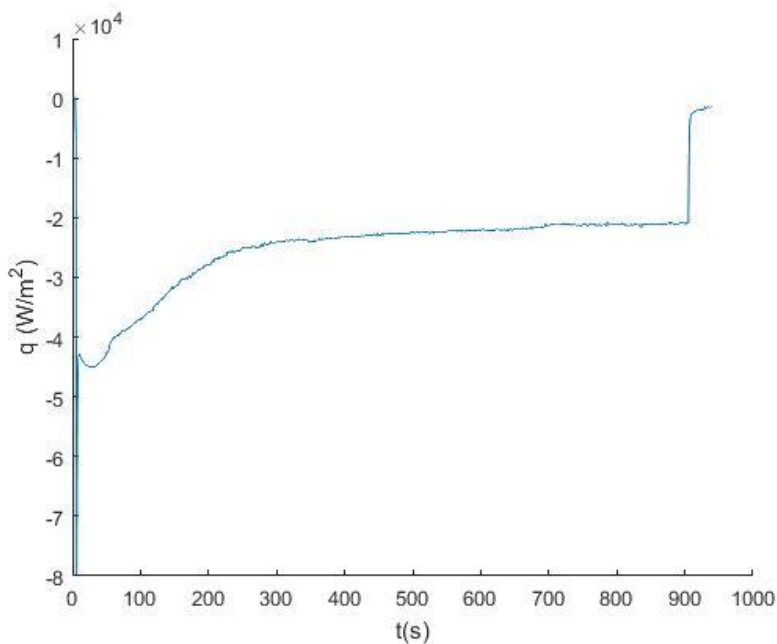
En esta posición se colocó la bobina justo en el centro de la placa, es decir, alineada directamente con el sensor de flujo y las mediciones obtenidas fueron las siguientes. Respecto a la temperatura medida a través del termopar, que viene señalado en la Figura 19, y en todas las demás a lo largo de este capítulo, como TC1.1, se obtuvo un valor de temperatura muy cercano a 400°C con un crecimiento similar a una función logarítmica.





**Figura 19. Temperatura del termopar en la posición 1**

En cuanto al flujo de calor, cabe destacar que las medidas halladas para este son de órdenes de magnitudes negativas debido a la colocación del sensor, ya que para poder sujetar a éste perfectamente sobre la placa se tuvo que colocar de manera inversa. En la Figura 20, se puede observar que cuando han transcurrido aproximadamente 6 minutos se alcanza el estado estacionario y la curva de flujo de calor se mantiene prácticamente constante.



**Figura 20. Flujo de calor en el sensor en la posición 1**

En cuanto a la temperatura obtenida en el sensor, Figura 21, se observa un comportamiento similar al de la medición en el termopar. Al haber transcurrido 6 minutos de funcionamiento de la bobina la temperatura en esta superficie comienza a aumentar de manera más progresiva.

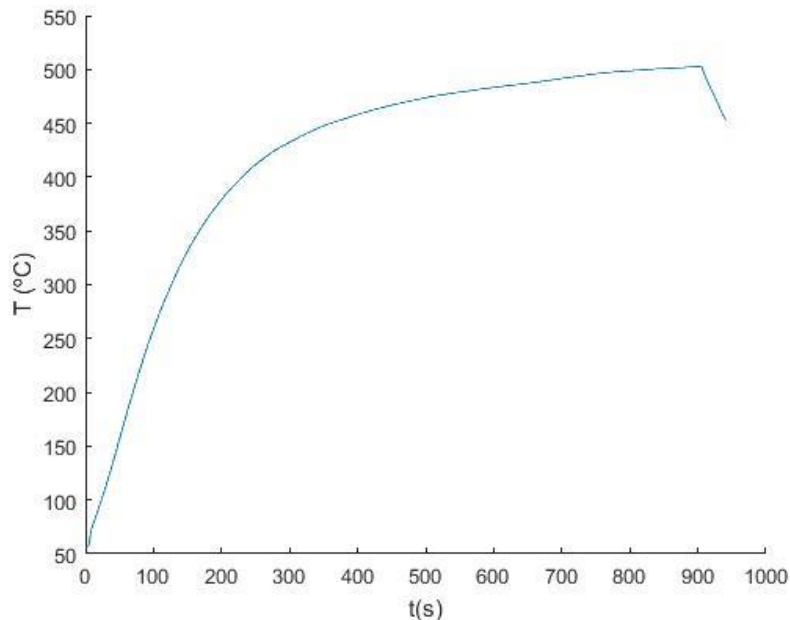


Figura 21. Temperatura en el sensor en la posición 1

Para conocer el flujo de calor que se transfiere a través de la placa en su eje X aplicamos las ecuaciones descritas anteriormente a partir de los valores de temperaturas obtenidos en un instante de tiempo de la simulación, a 700 segundos, que se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7. Intervalo de temperaturas en la posición 1

Localización	Valor
Termopar (TC 1.1)	405.102018°C
Sensor	521.14019°C

Resolviendo una iteración a partir de los valores de conductividad térmica en intervalos de 600K y 800K, que se muestran en la Figura 18, se conoce que para ordenes de 700K la conductividad térmica resulta ser de  $k = 21.2 \text{ W/mK}$

Al aplicar la ecuación (5) se obtiene una resistencia térmica de valor:

$$Rt = 1.415 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{K/W}$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación (4) obtendremos el valor del flujo de calor que se transfiere en el eje Z, sabiendo que el intervalo de temperaturas en esta posición

adquiere un valor de  $\Delta T = 116.038172$ , y por lo tanto el flujo de calor alcanzará un valor de  $q'' = 820.57 \text{ KW/m}^2$ .

Los datos de flujo calculados a través de la ecuación del principio de conducción se comentarán una vez se hayan realizado los cálculos de todas las posiciones.

### Posición 2:

Esta posición corresponde a una posición del inductor colocado a un cuarto del centro de la placa, es decir a 6.975cm del sensor.

En cuanto al valor de temperatura en el termopar (TC 1.1), se puede observar en la Figura 22 que, al igual que en la posición anterior, la temperatura aumenta de forma progresiva pero en este caso el máximo valor alcanzado se asemeja a valores de 250°C.

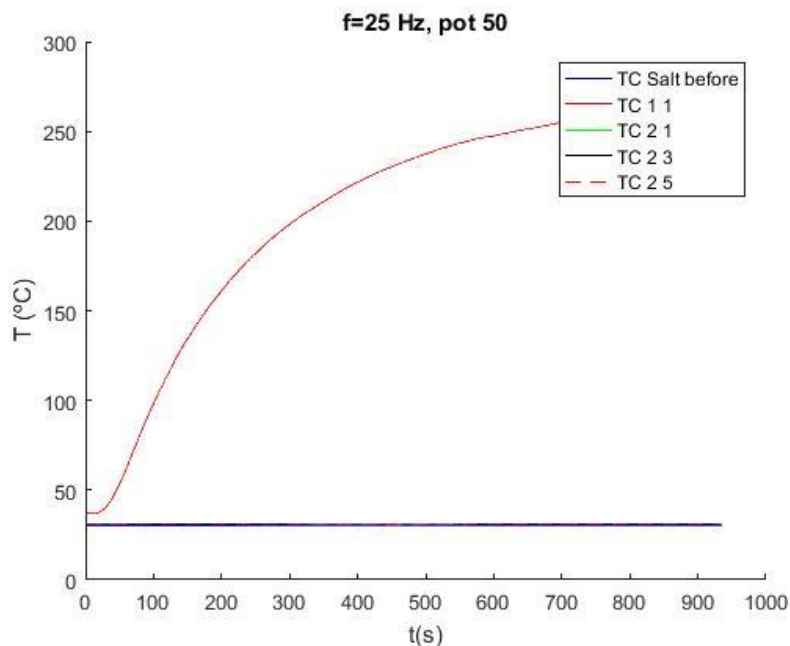
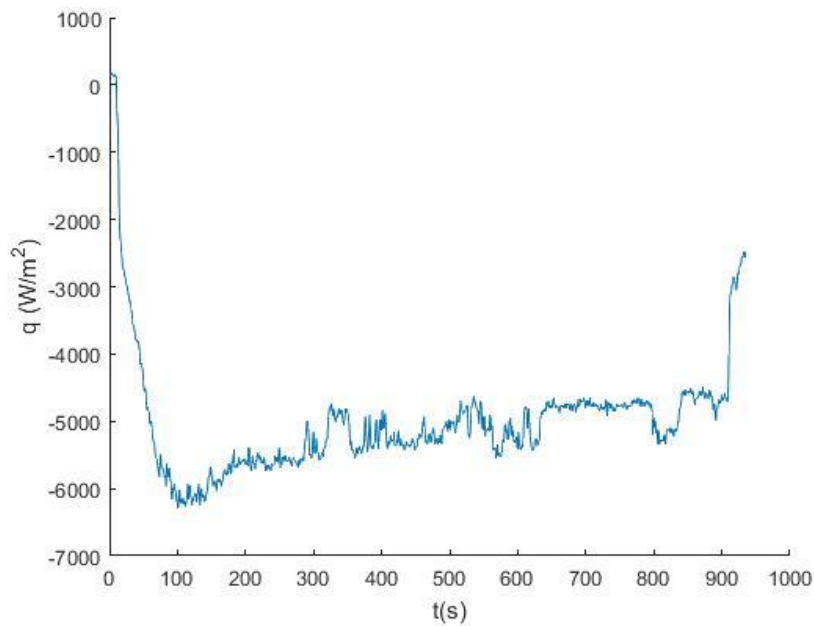


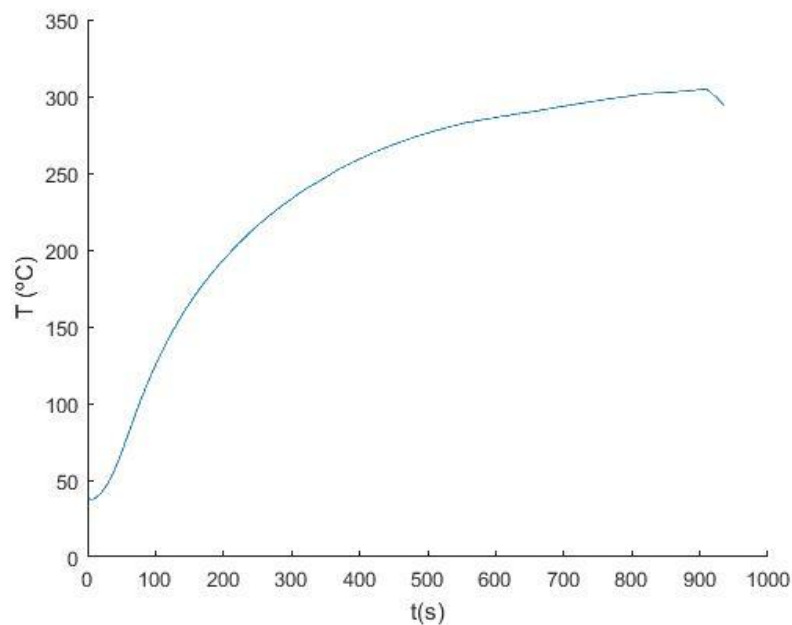
Figura 22. Temperatura en el termopar en la posición 2

En cuanto a flujo de calor, en la Figura 23 se puede observar que no se alcanza un valor constante en ningún momento sino que se muestra una función desigual, además de valores mucho más bajos que los obtenidos en la posición 1. Esto puede ser consecuencia de que al estar el sensor más alejado de la bobina las pérdidas en los ejes X e Y son mayores y la precisión del sensor disminuye.



**Figura 23. Flujo de calor en el sensor en la posición 2**

En cuanto a la temperatura obtenida en el sensor, al igual que en la posición anterior, la Figura 24 presenta un comportamiento similar a la medición del termopar, cumpliéndose que la temperatura de esta medición es mayor a la del termopar debido a las pérdidas producidas en las direcciones longitudinales de la placa.



**Figura 24. Temperatura en el sensor en la posición 2**

Del mismo modo que en la posición 1, para conocer el flujo de calor que se transfiere a través de la placa en su eje X aplicamos las ecuaciones descritas anteriormente. Las temperaturas obtenidas en cada cara de la placa para dicho instante de tiempo (700 segundos) se muestran en la Tabla 8:

Tabla 8. Intervalos de temperatura en la posición 2

Localización	Valor
Termopar (TC 1.1)	255.08419°C
Sensor	293.592627°C

En esta posición, las temperaturas alcanzan valores semejantes a 500K por lo que iterando a partir de los valores de la Figura 18, entre los valores del intervalo de 400 y 600K, se obtiene que la conductividad térmica para este rango de temperaturas es de  $k = 21.4 \text{ W/mK}$

Por lo tanto, a partir de la ecuación (4) y conocido que el valor de la resistencia es  $R_t = 1.4018 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ , obtendremos el valor del flujo de calor que se transfiere en el eje Z, sabiendo que el intervalo de temperaturas en esta posición adquiere un valor de  $\Delta T = 38.508437$ . De este modo el flujo de calor alcanzará un valor de  $q'' = 274.707 \text{ KW/m}^2$ .

### Posición 3:

En esta posición la bobina se colocó justo en el lateral de la placa, es decir, a 13.95cm del sensor. En la Figura 25, se puede observar que, en esta posición, la temperatura recogida por el termopar es muy baja en comparación con las posiciones anteriores alcanzando solo un valor semejante a 46°C.

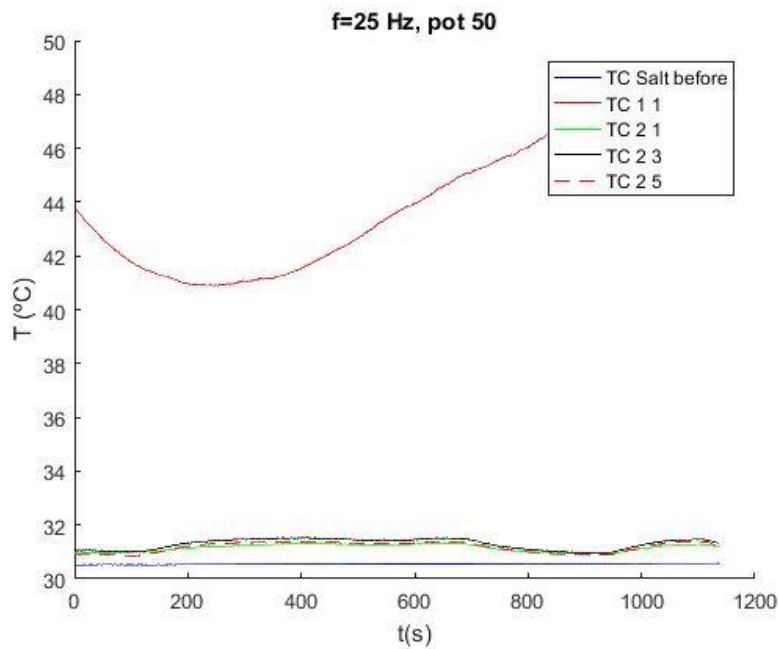


Figura 25. Temperatura en el termopar en la posición 3

En cuanto al flujo de calor, en la Figura 26 se puede apreciar fácilmente que este se mide en valores positivos lo que significa, según se ha comentado en la posición 1 sobre la colocación del sensor, que el flujo que llega al sensor es prácticamente nulo en esta posición.

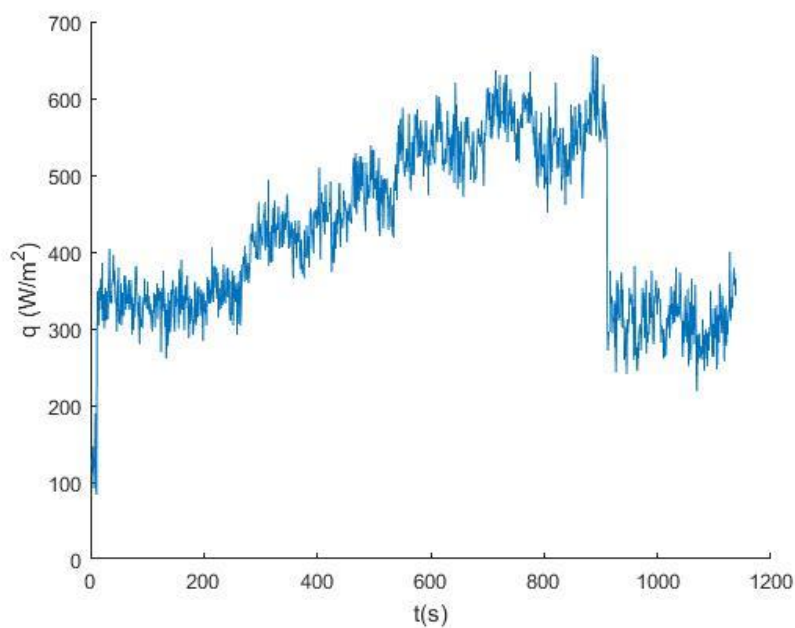


Figura 26. Flujo de calor en el sensor en la posición 3

En la Figura 27 se puede corroborar lo que se ha explicado anteriormente sobre la gráfica de flujo de calor. Como el flujo que detecta el sensor es prácticamente nulo la temperatura no es muy elevada y, además, al estar más alejado de la superficie de contacto con la bobina tarda más tiempo en alcanzar dicha temperatura.

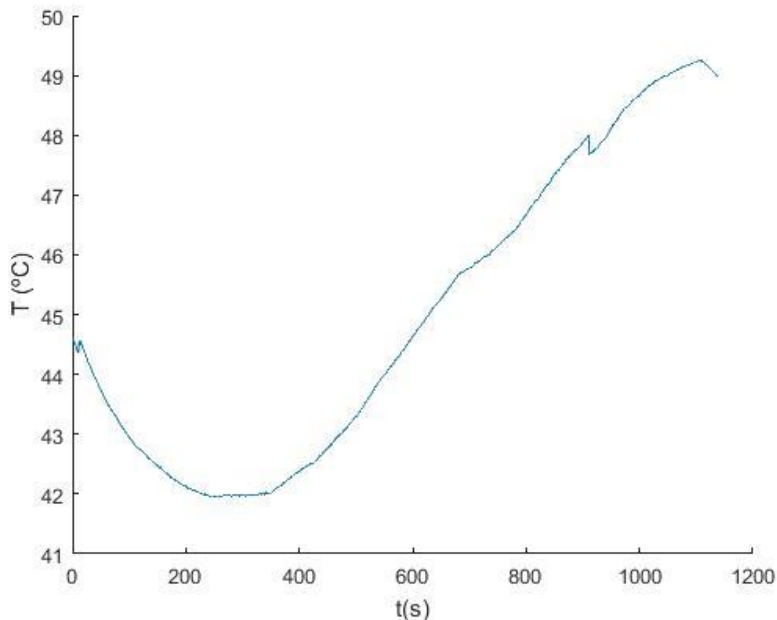


Figura 27. Temperatura en el sensor en la posición 3

Al igual que en las posiciones anteriores, para conocer el flujo de calor que se transfiere a través de la placa en su eje X, aplicamos las ecuaciones descritas anteriormente. Las temperaturas obtenidas en cada cara de la placa para dicho instante de tiempo (700 segundos) se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9. Intervalo de temperatura en la posición 3

Localización	Valor
Termopar (TC 1.1)	45.114287°C
Sensor	45.779236°C

En dicha posición, las temperaturas alcanzan valores semejantes a 300K por lo que, como se puede apreciar en la Figura 18, la conductividad térmica en esta posición es de  $k = 14.9 \text{ W/mK}$ . De esta manera, la resistencia térmica resulta ser:

$$Rt = 2.0134 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{K/W}$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación (4) obtendremos el valor del flujo de calor que se transfiere en el eje Z sabiendo que el intervalo de temperaturas en esta posición adquiere

un valor de  $\Delta T = 0.664949$ . De este modo el flujo de calor alcanzará un valor de  $q'' = 3.3 \text{ KW/m}^2$ .

#### Posición 4:

Corresponde con una colocación de la bobina igual a la posición 2 pero por el otro extremo del sensor. En esta posición, respecto tanto a la temperatura del termopar como a la del sensor y como respecto al flujo de calor, se cumplen las mismas funciones que en la posición 2, pero se va a analizar si las pérdidas de calor son iguales para ambos lados de los ejes.

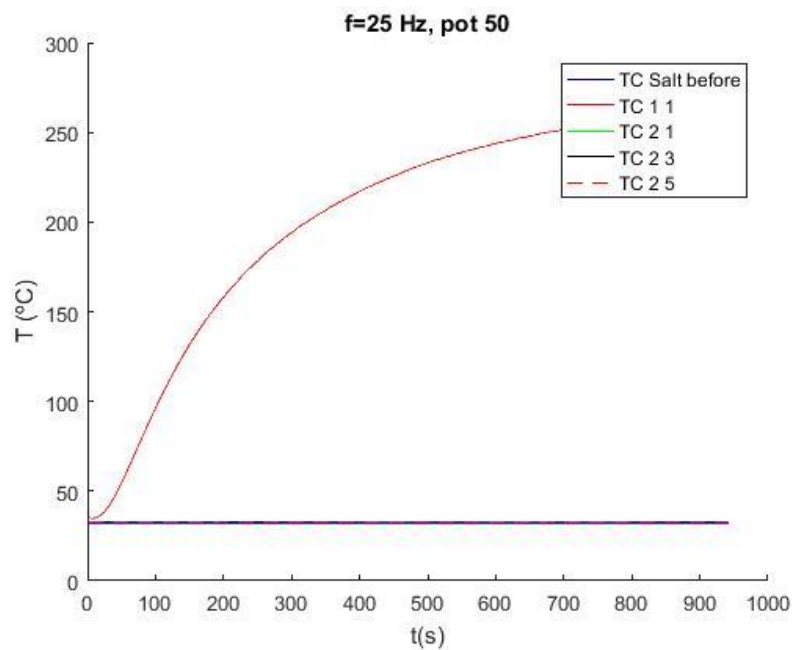


Figura 28. Temperatura en el termopar en la posición 4



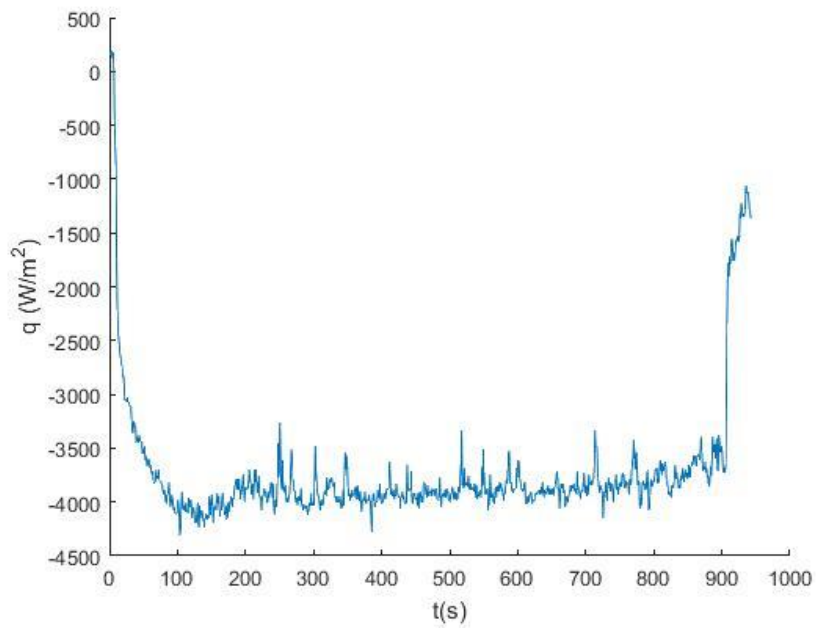


Figura 29. Flujo de calor en el sensor en la posición 4

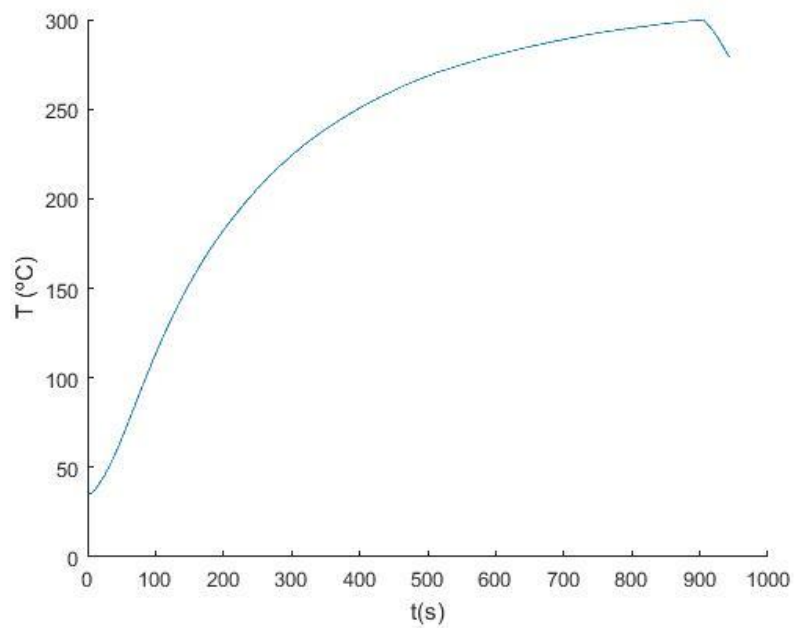


Figura 30. Temperatura en el sensor en la posición 4

Al igual que en posiciones anteriores, el intervalo de temperaturas detectado a los 700 segundos de funcionamiento del inductor se muestra en la Tabla 10:

**Tabla 10. Intervalo de temperaturas en la posición 4**

Localización	Valor
Termopar (TC 1.1)	251.727050°C
Sensor	288.895177°C

En esta posición, las temperaturas alcanzan valores semejantes a 500K por lo que iterando a partir de los valores de la Figura 18 entre los valores del intervalo de 400 y 600K se obtiene que la conductividad térmica para este rango de temperaturas es de  $k = 21.4 \text{ W/mK}$ . Se puede apreciar que ocurre lo mismo que en la posición 2.

Por lo tanto, a partir de la ecuación (4) y conocido que el valor de la resistencia es  $Rt = 1.4018 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ , obtendremos el valor del flujo de calor que se transfiere en el eje Z sabiendo que el intervalo de temperaturas en esta posición adquiere un valor de  $\Delta T = 37.168127$ . De este modo el flujo de calor alcanzará un valor de  $q'' = 265.145 \text{ KW/m}^2$ .

### **Posición 5:**

Corresponde con una colocación de la bobina igual a la posición 3 pero en el extremo opuesto de la placa

Al igual que ocurría en la posición 4 con respecto de la posición 2, en ésta se presentan las mismas funciones que en la posición 3 ya que simétricamente la bobina se encuentra situada en el mismo lugar. Pero de nuevo se estudiarán las pérdidas de flujo de calor.

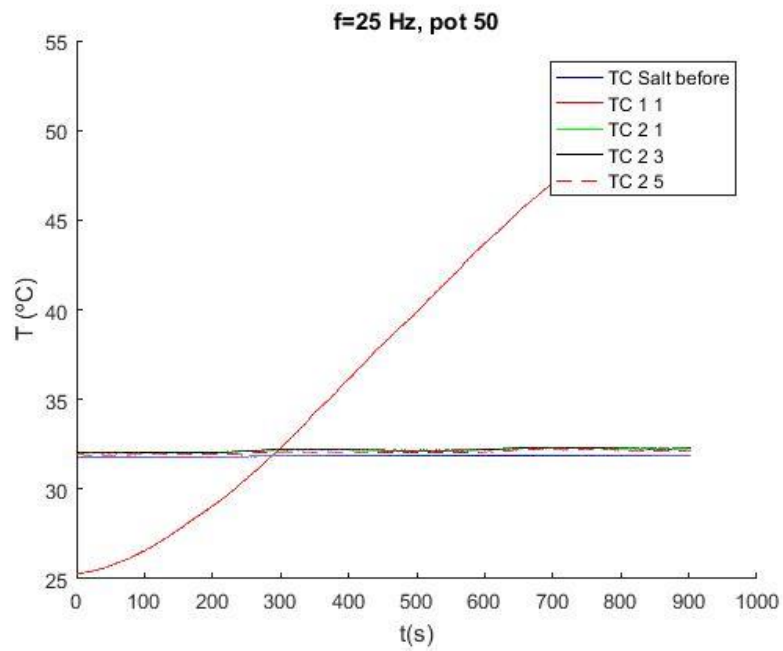


Figura 31. Temperatura en el termopar en la posición 5

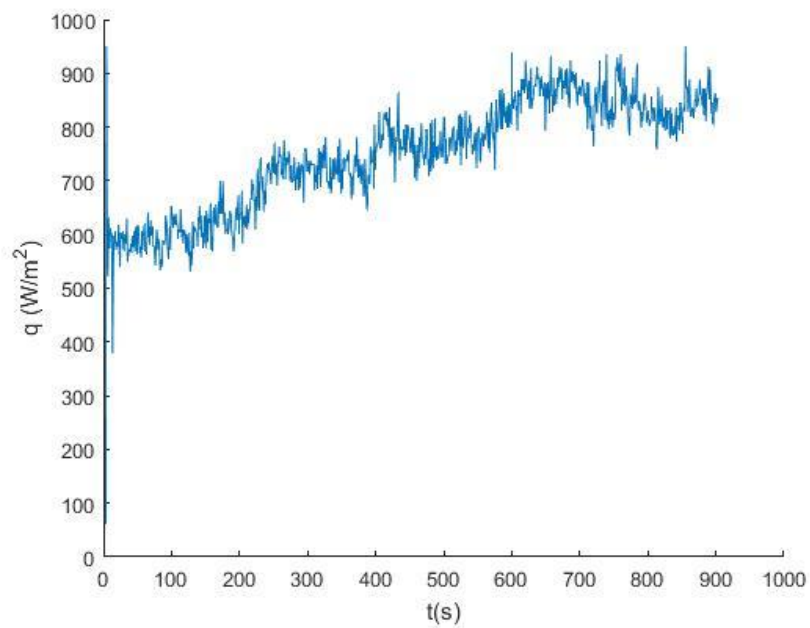


Figura 32. Flujo de calor en el sensor en la posición 5

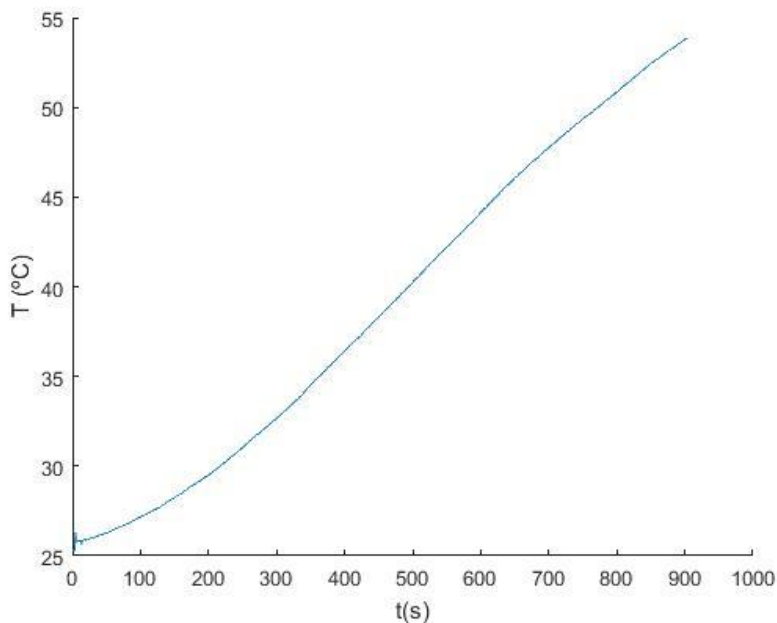


Figura 33. Temperatura en el sensor en la posición 5

En esta posición, el intervalo de temperaturas obtenido en un instante de tiempo de 700 segundos de trabajo se muestra en la Tabla 11:

Tabla 11. Intervalos de temperatura en la posición 5

Localización	Valor
Termopar (TC 1.1)	47.076135°C
Sensor	47.757309°C

En la posición 5, las temperaturas alcanzan valores semejantes a 300K, al igual que en la posición 3. Por lo que, como se puede apreciar en la Figura 18, la conductividad térmica en esta posición es de  $k = 14.9 \text{ W/mK}$ . De esta manera, la resistencia térmica resulta ser:

$$Rt = 2.0134 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{K/W}$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación (4) obtendremos el valor del flujo de calor que se transfiere en el eje Z sabiendo que el intervalo de temperaturas en esta posición adquiere un valor de  $\Delta T = 0.681174$ . De este modo el flujo de calor alcanzará un valor de  $q'' = 3.38 \text{ KW/m}^2$ .

**Posición 6:**

Corresponde con una colocación de la bobina a 1cm del extremo de la paca, es decir, a 14.95cm del sensor. Respecto a la temperatura detectada por el termopar, como se observa en la Figura 34 se produce un calentamiento similar al que se observa en las posiciones 3 y 5 pero con un valor de temperaturas más bajo, lo que resulta lógico ya que la bobina está 1cm más alejada.

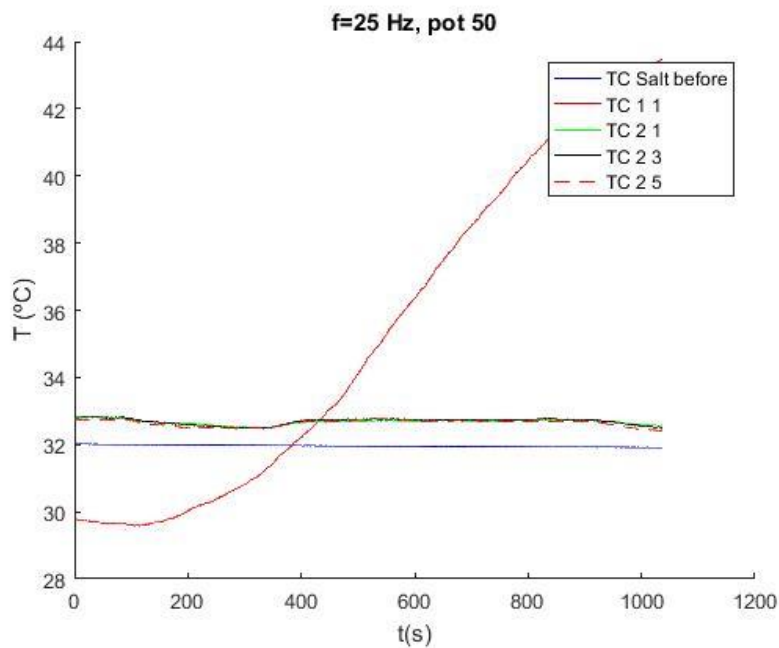
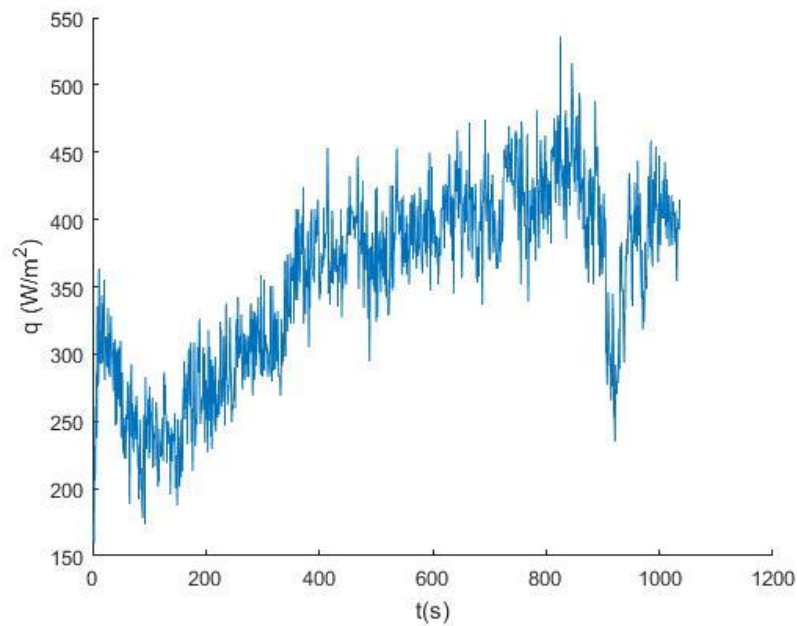


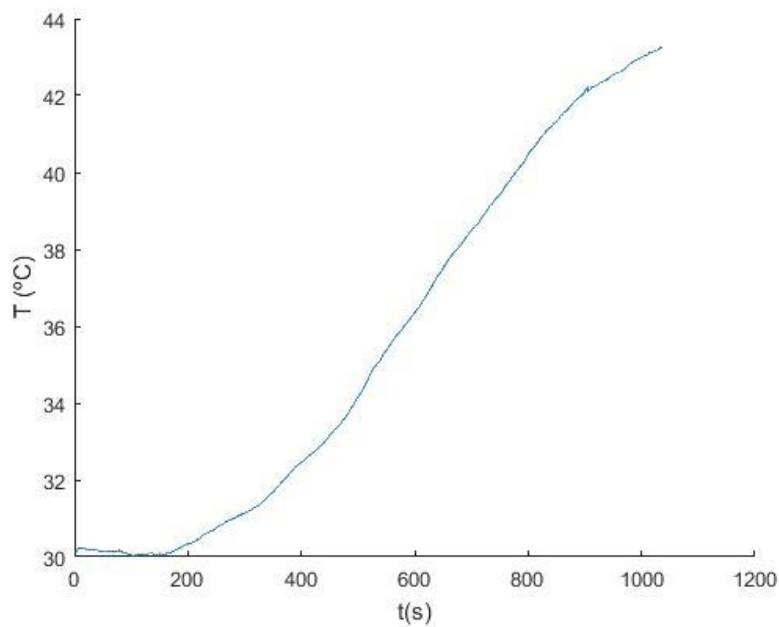
Figura 34. Temperatura en el termopar en la posición 6

Respecto a los valores del flujo de calor, en la Figura 35 se muestran valores elevados, pero como son valores positivos resulta que el flujo que llega al sensor en esa posición de la bobina es totalmente nulo, teniendo en cuenta las especificaciones realizadas anteriormente.



**Figura 35. Flujo de calor en el sensor en la posición 6**

De nuevo y de manera similar a como se observaba en las posiciones 3 y 5, la temperatura recogida por el sensor presenta un comportamiento prácticamente idéntico al recogido por el termopar, como se observa en la Figura 36.



**Figura 36. Temperatura en el sensor en la posición 6**

De nuevo, el intervalo de temperaturas obtenido a los 700 segundos se muestra en la Tabla 12:

Tabla 12. Intervalos de temperaturas en la posición 6

Localización	Valor
Termopar (TC 1.1)	38.493500°C
Sensor	38.529648°C

En esta posición los valores de temperatura son del orden de 300K lo que significa que, según la Figura 18, el valor de la conductividad térmica es  $k = 14.9 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Conociendo que en este caso el gradiente de temperaturas es  $\Delta T = 0.036148$ , el cual resulta ser una cifra muy reducida, el flujo de calor que se transfiere es totalmente nulo.

### Posición 7:

Corresponde con una colocación de la bobina igual a la posición 6 pero desde el extremo opuesto de la placa. De esta manera se cumple que, tanto respecto al desarrollo de temperaturas como al del flujo de calor, las funciones son muy similares a las mostradas en la posición 6 pero teniendo en cuenta que esta vez las temperaturas son algo más bajas que en la posición anterior alcanzando valores de unos 35°C

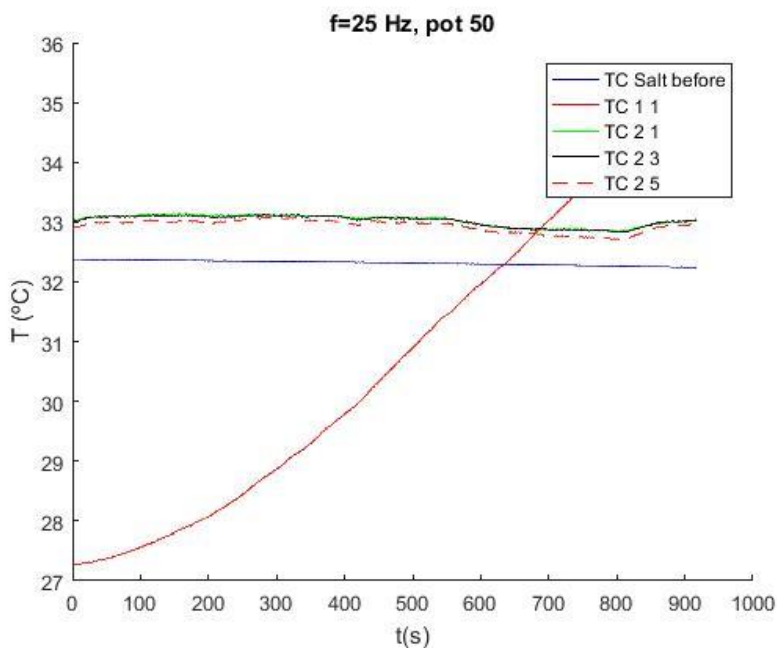


Figura 37. Temperatura en el termopar en la posición 7

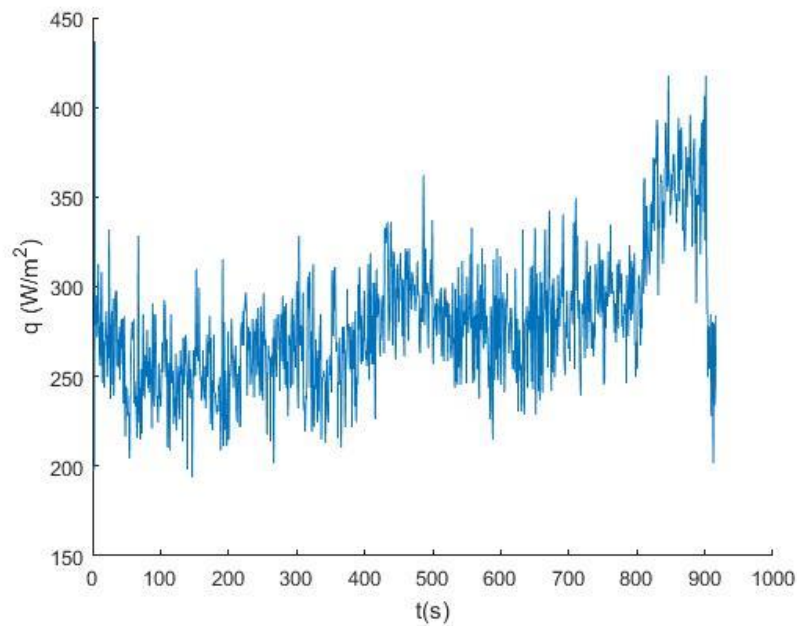


Figura 38. Flujo de calor en el sensor en la posición 7

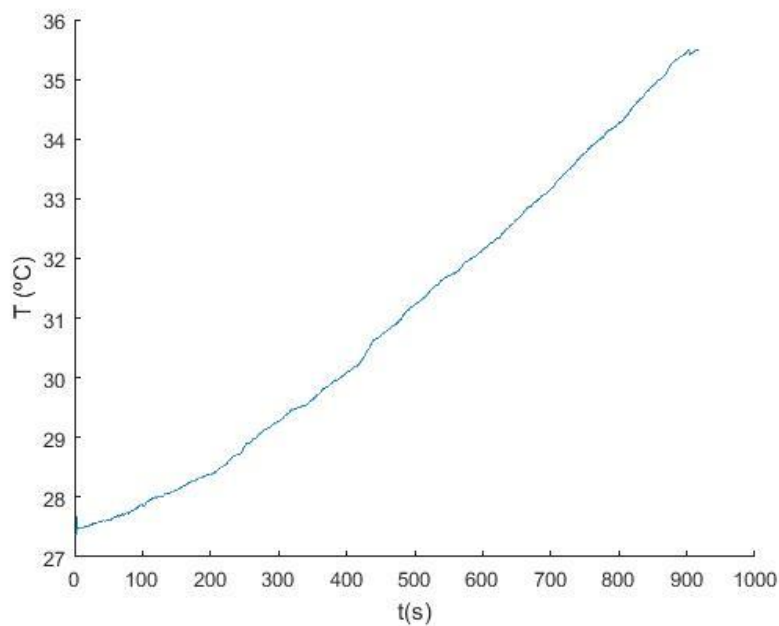


Figura 39. Temperatura en el sensor en la posición 7

Al igual que ocurría con los valores de la posición 6, en esta las temperaturas alcanzan valores similares a los 300K, como se muestra en la Tabla 13, por lo que la conductividad térmica de nuevo es  $k = 14.9 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Además, se cumple que, como el gradiente de temperaturas es prácticamente nulo, el flujo de calor alcanzaría un valor ínfimo, tal y como se observa en la Figura 38.



Tabla 13. Intervalos de temperaturas en la posición 7

Localización	Valor
Termopar (TC 1.1)	33.031372°C
Sensor	33.171069°C

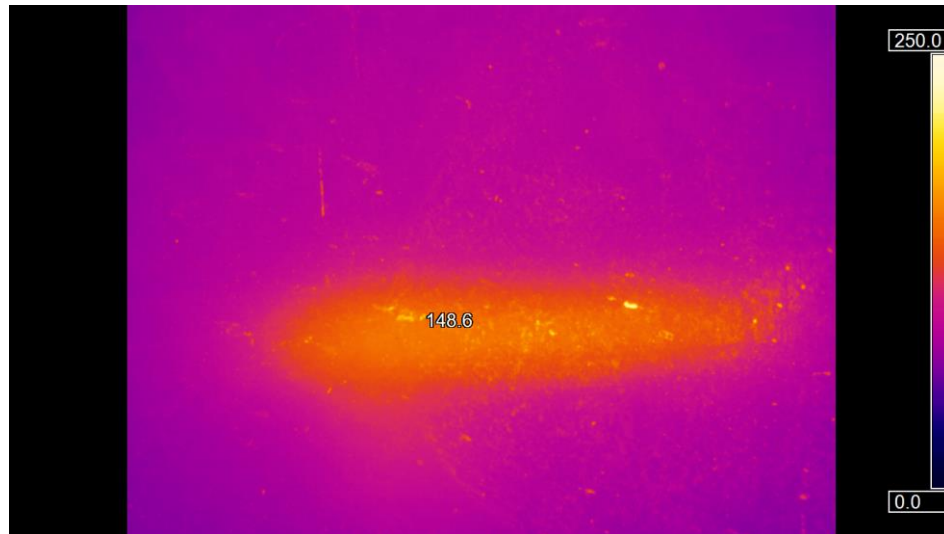
Una vez calculado el flujo de calor que teóricamente se transfiere a través de la placa partiendo del gradiente de temperaturas, se aprecia que no existe concordancia con el valor de flujo que nos proporciona el sensor. Esto es debido a que, en el momento que comienza a trabajar la bobina, la placa recibe mucho calor y pandea lo que provoca que el sensor y la placa no estén en total contacto.

Por lo tanto, la medida de temperatura de la superficie que proporciona el sensor no puede tomarse como válida, lo que conlleva a no poder conocer exactamente las pérdidas que se producen a través de los ejes longitudinales de la placa. Sino que solamente se podrá conocer una medida estimada del flujo que circula por dentro de esta, que corresponde con la medida del sensor.

## 4.2 Imágenes de la transferencia de calor

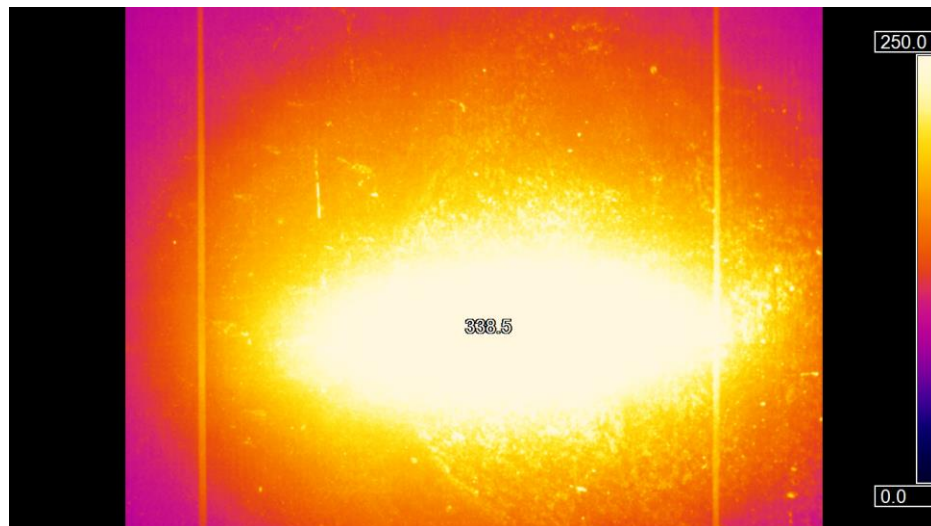
Como los resultados obtenidos anteriormente no resultan fiables, para apreciar de mejor manera la transferencia de calor producida en el interior de la placa por el ejes longitudinales de ésta, es decir, los ejes X e Y, se utilizó la cámara termográfica.

Como se puede apreciar en la Figura 40 en el instante en el que se enciende el inductor sólo se aprecia calor en la placa sobre la superficie en contacto con la bobina, es decir, aún no se produce transferencia por los ejes longitudinales.



**Figura 40. Imagen térmica de encendido del inductor**

Por el contrario, en la Figura 41 se puede apreciar que tras 11 minutos de funcionamiento del inductor, casi al finalizar la medición, la transferencia de calor no sólo se produce en el eje transversal a la superficie sino que se aprecia una alta transferencia de flujo de calor, sobre todo, por el eje Y donde se puede apreciar un color de la imagen muy anaranjado lo que significa valores de temperatura bastante elevados.



**Figura 41. Imagen térmica tras 11 minutos**

### 4.3 Mediciones con el circuito de sales

Para finalizar la parte experimental de este proyecto, se realizaron medidas con el circuito de sales en movimiento por lo que se puso en marcha el sistema de traceado. De esta manera también se pudo comprobar si el traceado funcionaba correctamente y poder estudiar tanto la distribución de temperaturas que generaba como el instante en el que se alcanzaba el estado estacionario.

El objetivo de esta última parte consiste en obtener los valores de temperatura a lo largo de la superficie externa del tubo y en distintas posiciones axiales con la utilización, como se ha explicado anteriormente, de termopares tipo K soldados a la tubería. En total se han utilizado 16 termopares dispuestos de la siguiente manera:

- Seis termopares separados con ángulos de  $60^\circ$  entre sí colocados en la zona axial correspondiente con el eje central de la bobina (sección C-C)
- Seis termopares separados con ángulos de  $60^\circ$  entre sí que distan 75 mm del centro de la bobina (sección B-B)
- Dos termopares separados con ángulos de  $180^\circ$  entre sí que distan 200 mm del centro de la bobina (sección A-A)
- Dos termopares separados  $180^\circ$  entre sí que distan 200 mm del centro de la bobina (sección D-D)

En la Figura 42 se muestra un esquema de la distribución de los termopares a lo largo del tubo:

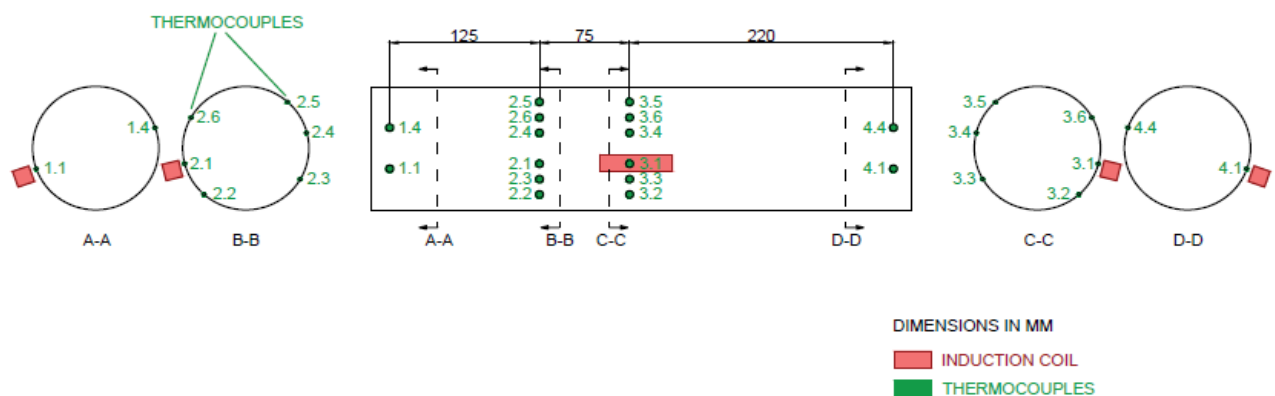


Figura 42. Distribución termopares en el tubo

Además de los termopares colocados en el tubo, se utilizaron cuatro termopares tipo K en el interior del depósito de sales para asegurar que la temperatura de estas se mantuviera entre los 300 y los 500  $^\circ\text{C}$ .

La realización de estas medidas se hizo a través de una programación del set point del inductor en modo “rampa” para conseguir un calentamiento más progresivo, mientras que si se programase en un modo “escalón” el calentamiento se produciría de forma más repentina. De esta manera, la secuencia de calentamiento respecto del tiempo consiste en que durante el primer minuto de estudio el inductor no proporciona calor al tubo. Seguidamente, durante cinco minutos el inductor proporciona 4kW de potencia lo que equivaldría a un flujo de calor del orden de  $1\text{MW/m}^2$ . Finalmente, en el último minuto de estudio se produce la parada del inductor.[22]

En primer lugar se realizaron medidas con una programación del inductor de un 10% de potencia. En la Figura 43 se muestran las temperaturas de los termopares situados en el depósito de sales ( T tank high y T tank med). En ella se puede apreciar que, al alcanzar el flujo de calor valores tan elevados, las temperaturas de las sales se mantienen prácticamente constantes y ocurre lo mismo a todos los niveles de potencia.

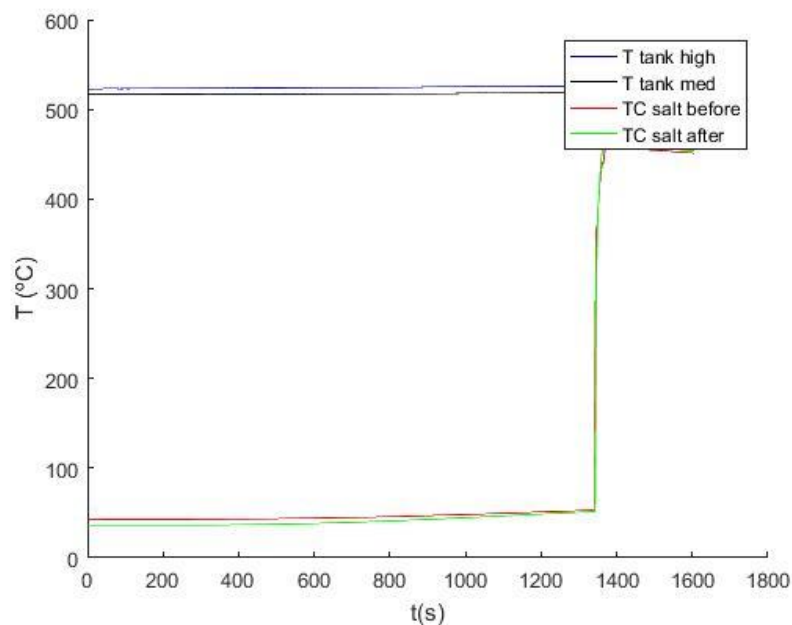


Figura 43. Temperatura de las sales en el depósito

En la Figura 44 se muestra la distribución de temperaturas que miden los termopares de la zona central de estudio, es decir, los más cercanos a la superficie de contacto con la bobina del inductor, que corresponden con el corte transversal C-C que se aprecia en la Figura 42.

El termopar TC 3.1, se encuentra colocado justo en la superficie del tubo que corresponde con el centro de la bobina, de esta manera se corrobora que sea el termopar que más temperatura alcanza, aproximadamente  $400^{\circ}\text{C}$ . Esto se debe a que el flujo proporcionado por el inductor llega directo a ese termopar sin transferencia de calor por otros ejes longitudinales.

Por el contrario, el resto de medidas de termopares que aparecen en la Figura 44 corresponden con una posición equivalente a la del termopar TC 3.1 pero separados axialmente entre sí, tal y como se muestra en la Figura 42. Se corrobora de nuevo que los termopares TC 3.6 y TC 3.2, los cuales miden entre 250 y 300°C, alcanzan mayor temperatura que los termopares TC 3.4, TC 3.5 y TC 3.3, cuyos valores no llegan a los 200°C. Es decir, las mayores temperaturas se alcanzan en la cara frontal del tubo mientras que la cara posterior prácticamente no se ve influenciada por la transferencia de calor.

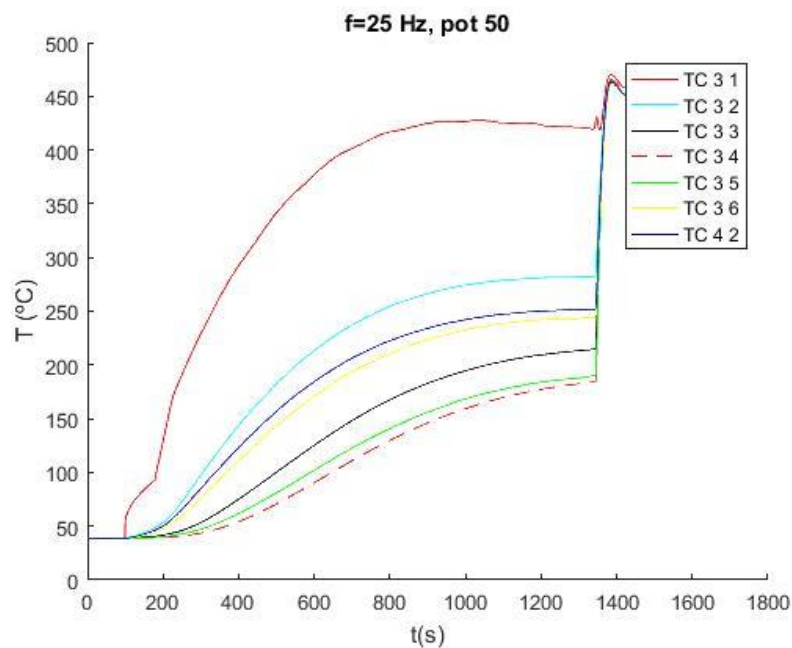
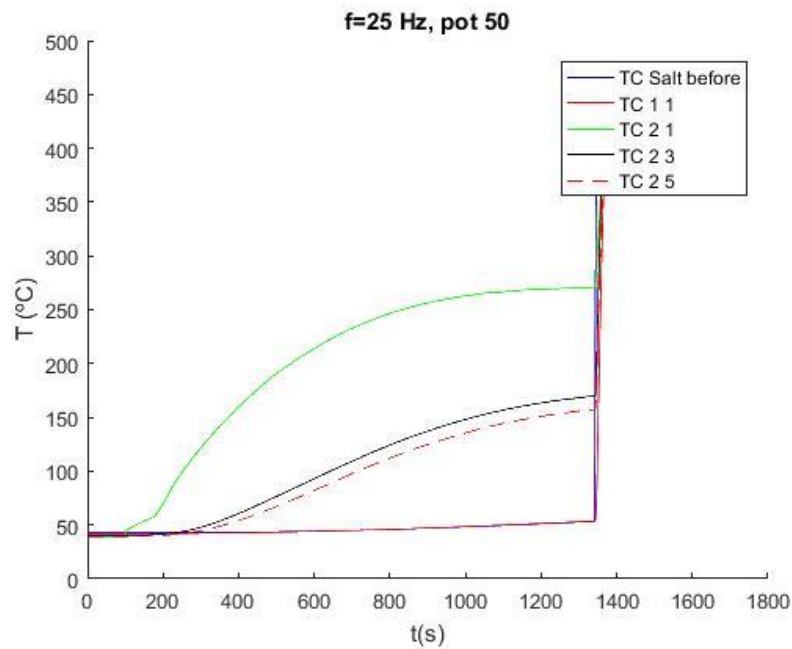


Figura 44. Termopares en el tubo al 10%. Sección C-C

En la Figura 45 se muestra la distribución de temperaturas que mide el termopar TC 1.1, el cual está situado en una sección axial que dista 200 mm del centro de la bobina. Se puede apreciar que en esta posición la temperatura detectada por el termopar es de unos 50°C lo que significa que la transferencia de calor, en una zona relativamente alejada del área de estudio, es prácticamente nula.

Además, en la Figura 45, también se muestran tres termopares colocados en la sección transversal B-B tal y como se explica en la Figura 42. Se corrobora una vez más que en la zona frontal del tubo, que corresponde con el termopar TC 2.1, la temperatura alcanzada es mayor que en la pared posterior, que corresponde con los termopares TC 2.5 y TC 2.3, cuyo intervalo de diferencia es de unos 100°C.

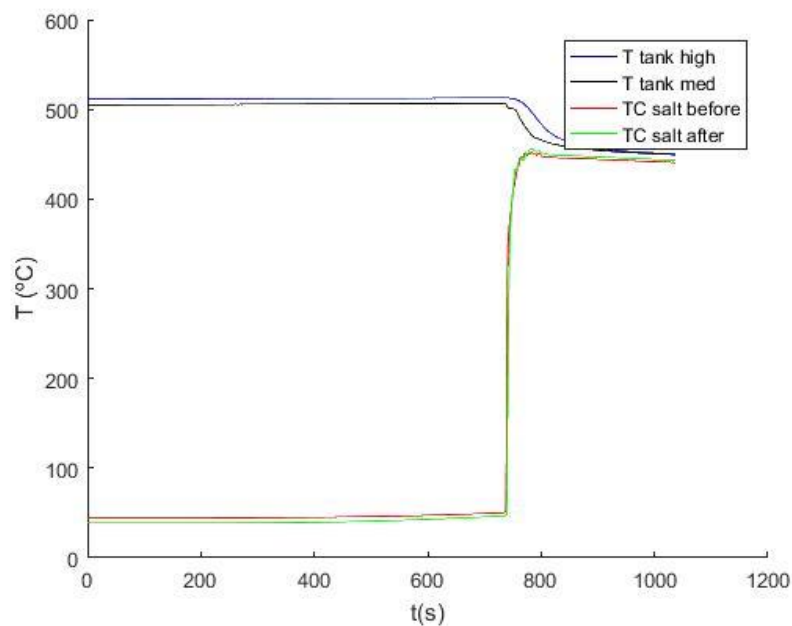


**Figura 45. Termopares en el tubo al 10%**

De este modo, tal y como se podía observar en las imágenes captadas por la cámara termográfica en la placa plana, se produce transferencia de calor en los ejes longitudinales a lo largo de las paredes del tubo, además de conducción a través del espesor de dicho elemento. Por ello, el termopar TC 2.1, colocado a 200 mm del eje central de la bobina, detecta un intervalo de temperaturas entre 250 y 300°C cuando se ha alcanzado el estado estacionario, distando casi 200°C de la temperatura recogida por el termopar TC 3.1, que corresponde a la cara frontal del tubo en contacto con la bobina.

Por último, se programó el inductor a un 20% de potencia obteniéndose los siguientes resultados.

Como se puede apreciar en la Figura 46, y al igual que ocurría con la anterior programación del inductor, las temperaturas del depósito de sales se mantienen constantes debido a los altos valores que alcanza el flujo de calor.



**Figura 46. Termopares del depósito de sales**

En la Figura 47 se muestran las mediciones de temperaturas tomadas por los termopares colocados en la sección transversal C-C, mostrada en la Figura 42. Como ocurría en la programación anterior, el termopar TC 3.1 es el que mayores valores de temperatura alcanza, aproximadamente 700°C. Además, se corrobora de nuevo que los termopares TC 3.6 y TC 3.2, correspondientes a la cara frontal del tubo, alcanzan mayores temperaturas que los termopares TC 3.4, TC 3.5 y TC 3.3, que corresponden a la cara contraria.

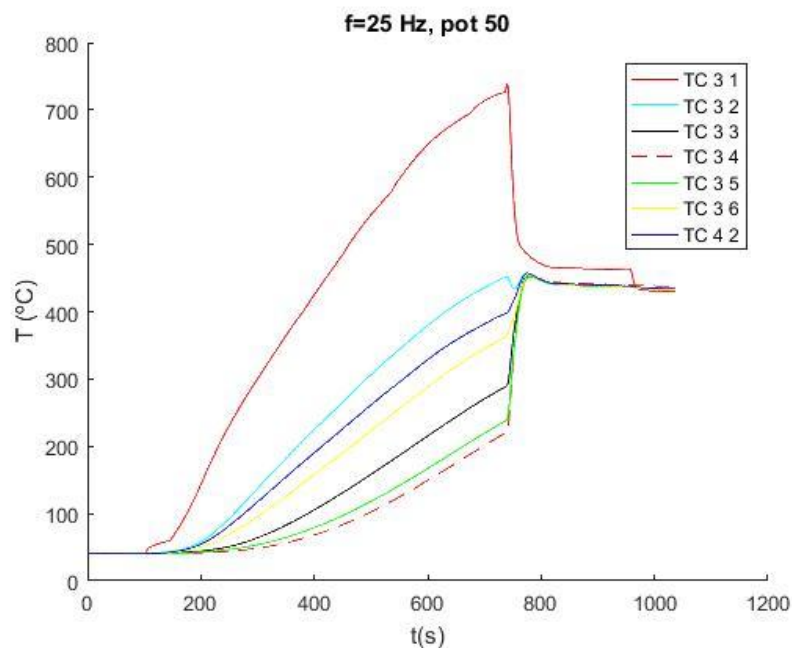


Figura 47. Termopares en el tubo al 20%. Sección C-C

En la Figura 48 se muestran los valores de temperatura que detectan el termopar TC 1.1 y los termopares colocados en la sección B-B, explicada en la Figura 42.

Se puede apreciar que el termopar TC 1.1 se mantiene a una temperatura prácticamente constante y de valor semejante a 50°C, lo que corrobora que a esa distancia de la bobina la transferencia de calor es prácticamente nula ya que su temperatura coincide con la obtenida en la programación anterior. Además, al igual que ocurría con los termopares colocados en la sección C-C, se cumplen las mismas distribuciones de temperaturas que con una programación del 10%. Es decir, la zona frontal del tubo (TC 2.1) adquiere temperaturas superiores a la cara posterior (TC 2.5 y TC 2.3), con una diferencia de aproximadamente 200°C.



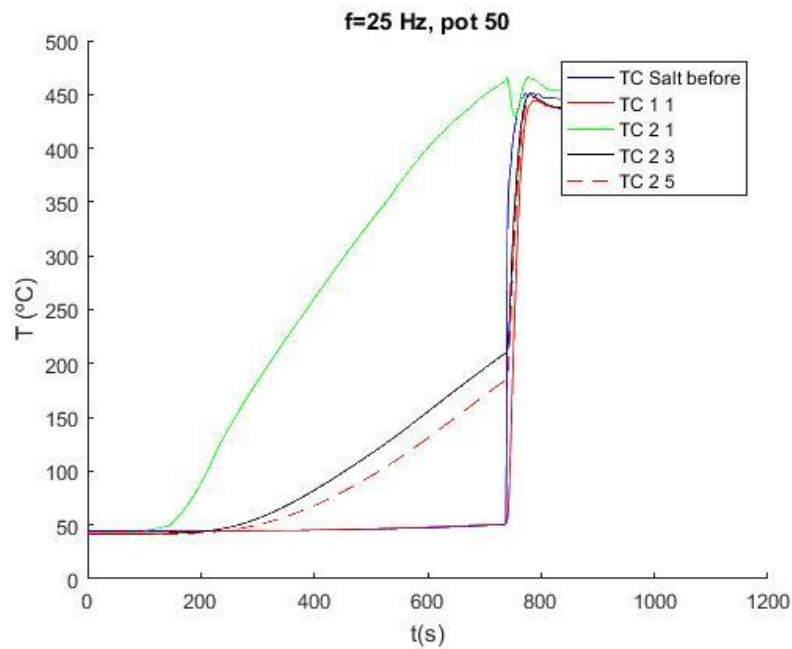


Figura 48. Termopares del tubo al 20%

Tras realizar las mediciones con dos porcentajes diferentes de potencia se puede concluir que el nivel de potencia que proporcione el inductor resulta ser un parámetro muy significativo ya que cuanto mayor sea este porcentaje mayores distribuciones de temperatura se obtendrán. Es decir, a mayor potencia aparecerán mayores esfuerzos de fatiga en las paredes del tubo.

## Capítulo 5. Conclusiones

A lo largo de este Trabajo Fin de Grado se ha intentado recalcar la importancia del desarrollo y utilización de las energías renovables como sustitutas de las fuentes tradicionales de energía, es decir, de los combustibles fósiles ya que, como se ha explicado a lo largo de este documento, suponen una fuente inagotable de recursos y son más limpias y respetables con el medio ambiente.

Tras realizar un análisis de la situación energética europea se ha logrado comprobar que, en los últimos años se ha producido un aumento de las inversiones en energías renovables, destacando la energía solar como una de las más prometedoras actualmente debido a que presenta una alta eficiencia energética, la posibilidad de almacenar energía y, además, se están realizando varios estudios para poder combinarla con otros tipos de fuentes de energía renovables. Además, como ya se ha destacado anteriormente, España se coloca como pionera mundial de producción de energía a través de centrales solares, a pesar de que el resto de energías renovables en España cada vez están disminuyendo más su nivel de uso y gestionabilidad.

Por este motivo, este Trabajo Fin de Grado se basa en un estudio de eficiencia de las centrales térmicas solares de torre en relación al proyecto *Estudio y diseño de nuevos receptores centrales solares* llevado a cabo por el Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos de la Universidad Carlos III.

El objetivo principal de este proyecto consiste en el estudio de la distribución de temperaturas a lo largo de la pared de un tubo de acero inoxidable 304, que forma parte de una simulación de una central solar de torre, y poder conocer así el estrés térmico y las deformaciones surgidas en el tubo receptor. Para simular la radiación solar que absorbe el tubo en una instalación real se ha utilizado un inductor cuya bobina se ha colocado a 8mm de la pared del tubo.

En primer lugar, se estudió la transferencia de calor en una placa plana, del mismo material que el tubo receptor, para poder estudiar más detalladamente la distribución de temperaturas cuando la bobina se colocaba a diferentes distancias del sensor de flujo. A través de estas medidas y de las imágenes captadas por la cámara termográfica, se conoce que el flujo de calor que se transfiere por conducción a través de la placa no solo se produce en el eje que sigue su espesor, el eje transversal, sino también a lo largo de sus secciones longitudinales. De esta forma, al colocar el sensor separado cierta distancia del centro de la bobina se aprecia un aumento de la temperatura. Aunque cabe destacar que a ciertas distancias la transferencia de calor resulta ser prácticamente nula.

Como se ha explicado, uno de los objetivos de este proyecto es el estudio de las variaciones térmicas y de forma que sufre el receptor, para poder mejorarlo y aumentar así el rendimiento de la planta. Por ello se pone en marcha el circuito de sales, su correspondiente sistema de traceado y se coloca, en la zona de análisis, la bobina de inducción para calentar la pared frontal del tubo receptor, simulando la radiación solar. Se obtienen así unas distribuciones de temperaturas en la cara frontal del tubo, la pared que está en contacto directo con la bobina, de valores mucho más elevados a los obtenidos en la pared posterior, lo que provoca estrés térmico en las paredes del tubo y que estas varíen su forma.

Para la puesta en marcha de las mediciones se ha de conocer que el sistema de traceado ha de ser encendido, aproximadamente, 2 horas antes del inicio del ensayo para evitar que las sales se solidifiquen en el momento que entran en contacto con el tubo. Además, como se ha explicado previamente en este informe, las sales han de mantenerse fundidas y a niveles entre 300 y 500°C.

Es importante destacar que variando la frecuencia de trabajo de la bomba se consiguen resultados de temperatura distintos, ya que la velocidad de las sales interfiere directamente en la transferencia de calor. De este modo, cuanto mayor sea la velocidad de circulación de las sales mayor será la transferencia de calor entre las paredes del tubo y las sales, por lo que las temperaturas obtenidas en las paredes serán más bajas.

Este proyecto sirve de base de mediciones para el futuro estudio de mejora del diseño de receptores intentando evitar, en medida de lo posible, los esfuerzos de fatiga sin que se vea involucrado el rendimiento de la planta.

## Capítulo 6. Bibliografía

- [1] “Las energías renovables gestionables son imprescindibles para la transición energética,” 11 Mayo de 2018. *Ecoticias.com*. [Online]. Available: <https://www.ecoticias.com/energias-renovables/183929/energias-renovables-gestionables-son-imprescindibles-transicion-energetica>. [Accessed: 29-Aug-2018].
- [2] C. Villasante, “La ‘gestionabilidad’, principal desafío de las energías renovables,” *techWeek.es*. [Online]. Available: <http://www.techweek.es/empresas/informes/1018378002701/gestionabilidad-principal-desafio-energias-renovables.1.html>. [Accessed: 29-Aug-2018].
- [3] Red Eléctrica Española, “El sistema eléctrico español - Avance 2017,” 2017. [Online]. Available: [http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance\\_informe\\_sistema\\_electrico\\_2017\\_v3.pdf](http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance_informe_sistema_electrico_2017_v3.pdf). [Accessed: 21-Aug-2018].
- [4] BP, “Statcal review of world energy,” 2018. [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>. [Accessed: 21-Aug-2018].
- [5] M. Legrand, D. Ingenier, and G. Itea, “Fuentes de Energía Capítulo 4 : Petróleo . Combustibles líquidos y,” 2015. [Online]. Available: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-termica-y-de-fluidos/fuentes-de-energia-2013/material-de-clase-1/ocw-fe-cap04.pdf/view>. [Accessed: 26-Aug-2018].
- [6] P. S. De Co, “Fuentes de Energía,” 2015. .
- [7] “Marco sobre clima y energía para 2030.” [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es). [Accessed: 21-Aug-2018].
- [8] S. D. E. Estado and Y. Minas, “Estadística Minera de España,” 2016. [Online]. Available: <http://www.mincotur.gob.es/energia/mineria/Estadistica/2016/ESTADISTICA MINERA ESPAÑA 2016.pdf>. [Accessed: 23-Aug-2018].
- [9] A. I. D. E. Energía, “World Energy Outlook.” [Online]. Available: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2016\\_ExecutiveSummary\\_Spanishversion.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2016_ExecutiveSummary_Spanishversion.pdf). [Accessed: 19-Sep-2018].
- [10] “Paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020.” [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es). [Accessed: 19-Sep-2018].
- [11] International Energy Agency, “Hydropower,” 2018. [Online]. Available: <https://www.iea.org/topics/renewables/hydropower/>. [Accessed: 18-Sep-2018].

- [12] International Energy Agency, “Solar energy,” 2017. [Online]. Available: <https://www.iea.org/topics/renewables/solar/>. [Accessed: 18-Sep-2018].
- [13] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Bioenergy,” 2018. [Online]. Available: <http://www.irena.org/bioenergy>. [Accessed: 20-Sep-2018].
- [14] International Energy Agency, “Bioenergy and biofuels.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/topics/renewables/bioenergy/>. [Accessed: 20-Sep-2018].
- [15] E. S. Tames, “Colectores de Energía Cilíndricos. Ventajas,” *Red Social Ambiental Iberoamericana*, 2015. [Online]. Available: <http://www.sociedadambiental.net/profiles/blogs/colectores-de-energ-a-cil-andricos-ventajas>. [Accessed: 19-Sep-2018].
- [16] “Green Economy Offers a Double Dividend,” *Green business guide*, 2014. [Online]. Available: <http://www.greenbusinessguide.co.za/green-economy-offers-double-dividend/>. [Accessed: 19-Sep-2018].
- [17] “Energía solar térmica de alta temperatura,” Abril 2017. *Solar-energia.net*. [Online]. Available: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/alta-temperatura>. [Accessed: 19-Sep-2018].
- [18] A. Lecuona Neumann, “Fuentes de Energía Capítulo 8: Energía solar térmica y termoeléctrica,” OCW-UC3M. 2015. [Online]. Available: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-termica-y-de-fluidos/fuentes-de-energia-2013/material-de-clase-1/ocw-fe-cap08.pdf>. [Accessed: 27-Aug-2018].
- [19] “Funcionamiento de la energía solar térmica,” *Ekidom, Energías renovables*. [Online]. Available: <http://www.ekidom.com/funcionamiento-de-la-energia-solar-termica>. [Accessed: 19-Sep-2018].
- [20] “Código Técnico de la Edificación (CTE).”
- [21] G. Cervero Badía, “Modelado Y Análisis Del Receptor Exterior De Una Central Termosolar,” *Trabajo de fin de grado*, 2016. [Online]. Available: <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/48446><https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/48446>.
- [22] C. Marugan-Cruz, M. Fernandez-Torrijos, C. Sobrino, and D. Santana, “Medidas experimentales en un lazo de sales fundidas bajo un flujo de calor no uniforme,” 2017. Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos. Universidad Carlos III.
- [23] C. Marugan-Cruz, “Estudio y diseño de nuevos receptores de centrales solares.”
- [24] A.M.Papadoulous, *State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. Energy and buildings*. Elsevier, 2005.
- [25] GH Group, “¿Qué es el calentamiento por inducción?” [Online]. Available: <http://www.ghinduction.com/sobre-calentamiento-por-induccion/?lang=es>. [Accessed: 02-Sep-2018].
- [26] “Bobinas de trabajo de calentamiento por inducción,” *Ambrell Precision Induction Heating*. [Online]. Available:

- [https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell\\_PDFs/411-0168-16.pdf](https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf). [Accessed: 07-Sep-2018].
- [27] K.Coscia, A.Oztekin, S.Mohapatra, S.Neti, S.Nelle, and T.Elliot, “The Thermophysical Properties of the NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>, LiNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub>, and LiNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> Systems.” ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress. pp.889-894
- [28] “Termopar: tipos y aplicaciones,” *Omega Engineering*. [Online]. Available: <https://mx.omega.com/prodinfo/termopar.html>. [Accessed: 02-Sep-2018].
- [29] *NI 9219: Getting started guide*. National Instruments.
- [30] *NI 9203: Getting started guide*. National Instruments.
- [31] Frank P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentos de la Transferencia de Calor*. 4<sup>a</sup> edición, 1999.
- [32] Navia, “¿Qué es la estratificación térmica?,” 2017. [Online]. Available: <http://www.navia.mx/single-post/2013/05/01/¿Que-es-la-Estratificación-Térmica>. [Accessed: 04-Sep-2018].

## Capítulo 7. Anexos

A lo largo de este capítulo se explicará la puesta en marcha y apagado de todos los elementos necesarios para la realización de las pruebas experimentales.

### ANEXO I: Manual de operación del inductor

- **PROCEDIMIENTO PARA ENCENDER EL INDUCTOR**

1. Posición de encendido del interruptor general (posición a la derecha)
2. Subir el interruptor del inductor, situado en el cuadro general
3. Accionar la palanca del inductor, situado en la parte externa de la cabina del Sinac
4. Accionar el interruptor de seguridad que permite la alimentación eléctrica de la bomba y la máquina de refrigeración, situado en la pared a la izquierda de la ventana.
5. Subir el interruptor colocado a la izquierda de los interruptores de A/A y de la bomba, colocado en el cuadro general.
6. Subir el interruptor de la máquina de refrigeración (etiqueta A/A)
7. Encender la máquina de refrigeración, pulsando el botón de encendido del mando de dicha máquina situado sobre ésta.
8. Subir el interruptor de la bomba situado en el cuadro general

- **PROGRAMACIÓN DE LAS CURVAS DE CALENTAMIENTO**

Una vez realizada la puesta en marcha tanto del inductor como del sistema de refrigeración, será necesario programar las diferentes curvas de calentamiento que se van a utilizar en los ensayos. Para ello utilizaremos la pantalla situada en el cuadro del inductor, Figura 49:



Figura 49. Pantalla de programación del Sinac

1. Ir a la cabina del Sinac
2. Pulsar F9 para colocarnos en el menú principal en el que aparecen varios menús secundarios
3. Pulsar F3 (Menú secuencia). Este menú permite almacenar ocho programas diferentes con segmentos cada uno. Una vez dentro del mismo, los comandos a emplear serán los siguientes:
  - a) F0: Nos permite elegir el número de programa que queremos usar o modificar
  - b) F1: Nos permite movernos por los diferentes segmentos del programa
  - c) F2: Sirve para elegir el tipo de segmento que vamos a utilizar. En nuestro caso usaremos dos tipos de segmentos:
    - a. “Step”: Si queremos tener un valor constante durante un tiempo determinado.
    - b. “Ramp”: Si queremos que el segmento sea una pendiente creciente o decreciente.
  - d) F3: para elegir unidad de tiempo deseada para el segmento (horas, minutos o segundos).
    - Pulsando por primera vez la tecla de la flecha hacia abajo ↓ podemos establecer el tiempo de duración del segmento en cuestión. A continuación, pulsar ↵ para guardar el valor.



- Pulsando por segunda vez la tecla de la flecha hacia abajo ↓ podemos elegir el porcentaje de potencia al que va a trabajar el inductor en el segmento. En el caso de segmentos tipo “Ramp” el valor que hay que poner es el de la potencia final, ya que la inicial vendrá determinada por el ultimo valor del segmento anterior o, en el caso de que sea el primer segmento, siempre será cero. A continuación, pulsar ↵ para guardar el valor.

4. Pulsar F9 varias veces para regresar al menú principal
5. Pulsar F7 (Información del estado) para comprobar el caudal y la temperatura de entrada del agua del circuito de refrigeración. Comprobar que no hay alarmas activas
6. Pulsar ON para que la bobina comience a calentar
7. Pulsar F4 para mirar los valores de potencia en cada momento
8. Si se quiere detener el funcionamiento del inductor antes de que termine la secuencia marcada, pulsar OFF

- **PROCEDIMIENTO PARA APAGAR EL INDUCTOR**

1. Asegurarnos de que el inductor no está funcionando, para ello mirar la cabina del Sinac.
2. Apagar la máquina de refrigeración, pulsando el botón de encendido del mando de la máquina situado sobre ésta.
3. Bajar el interruptor de la bomba, situado en el cuadro general.
4. Subir la palanca del inductor situado en la parte exterior de la cabina del Sinac.
5. Bajar el interruptor del inductor situado en el cuadro general.

- **POSIBLES ALARMAS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN**

1. **C0:** Esta alarma indica que la bomba de la propia máquina de refrigeración no está en funcionamiento. Esto es debido a que le llega el caudal desde el Sinac antes de ella misma haberse puesto en funcionamiento y haber comenzado a bombear agua refrigerada. La solución es apagar la máquina de refrigeración desde su mando, bajar el interruptor de corriente de la bomba auxiliar, dentro del cuadro de control, esperar unos instantes, y continuación volver a subir el interruptor de

suministro de corriente de la bomba auxiliar, y seguidamente volver a encender la máquina de refrigeración.

2. **7H:** Se origina a causa de una falta de suministro de caudal en la máquina de refrigeración, lo cual suele suceder a causa de que la bomba auxiliar no está en funcionamiento. En dicho caso se debería apagar la máquina de refrigeración desde el mando del equipo, posteriormente subir el interruptor de corriente de la bomba auxiliar, y de nuevo volver a encender la máquina de refrigeración desde su propio mando. Otra posible causa es la acumulación de aire a la entrada de la máquina de refrigeración, en cuyo caso la solución sería purgar de aire del sistema, aunque en principio ya ha sido purgado, por lo que previsiblemente esto no será necesario.

## ANEXO II: Puesta en marcha del sistema de traceado

La puesta en marcha del sistema de traceado se realiza a través del cuadro eléctrico general y se han de activar los siguientes interruptores:

1. Interruptor general
2. Interruptor “Automático traceado”
3. Interruptores de traceado para “Tramo largo” y para “Tramo corto”

Una vez se han activado todos los interruptores necesarios del cuadro eléctrico se deberá configurar el set point de las sondas de traceado para cada tramo del lazo. Para ello se utilizarán los termostatos, mostrados en la Figura 50, de cada una de las partes.



Figura 50. Termostato del sistema de traceado

Como se aprecia en la Figura 50, este tipo de dispositivos contienen un interruptor P gracias al cual se pueden programar los diferentes modos de uso del termostato, una luz led que permanecerá encendida siempre que el sistema de traceado esté activo, es decir, mientras no se haya alcanzado el set point y dos interruptores simulando dos flechas para seleccionar los valores necesarios.

Los pasos a seguir en la configuración del termostato son:

1. Presionar el interruptor P durante unos segundos hasta que en la pantalla aparezcan las siglas “SP”
2. Con el uso de los interruptores de flecha configurar el valor de la temperatura que se desea
3. Presionar el interruptor P para confirmar la temperatura

Para apagar el sistema de traceado simplemente habrá que desconectar los interruptores del cuadro eléctrico que han sido accionados previamente.

## **ANEXO III: Encendido de las resistencias del depósito**

Para la puesta en marcha del sistema de calentamiento del tanque se seguirán los siguientes pasos:

1. Accionar el interruptor general del cuadro eléctrico
2. Accionar el interruptor que corresponde a las resistencias del tanque en el cuadro eléctrico
3. Girar la palanca de encendido en el cuadro de control de las resistencias hacia la posición ON

En este momento las resistencias comienza a calentar hasta alcanzar os valores de temperatura necesarios. Para editar dichos valores de temperatura, es decir, para editar el set point se utilizará el software iTools el cual está constituido por dos lazos en cascada. El lazo 1 sirve para modificar la temperatura de la sal introduciendo el nuevo valor a alcanzar, mientras que en el lazo 2, que es independiente del anterior, se programa el set point de la temperatura de la pared. Sin embargo, en el lazo 2 la temperatura no puede ser introducida manualmente sino que debe ser la diferencia de temperatura respecto a la sal.

## ANEXO IV: Puesta en marcha de las sales

Para la puesta en marcha del fluido caloportador es necesaria la puesta en marcha de la bomba del depósito principal para que el fluido de su interior, ya sea en estudios de agua o sales fundidas, comienza a ser bombeado y pueda circular por el interior de la instalación. Además se debe programar el variador de frecuencia para establecer la velocidad de giro del eje de la bomba, para ello se ha de utilizar la pantalla situada en la caja del variador de frecuencia mostrada en la Figura 51:

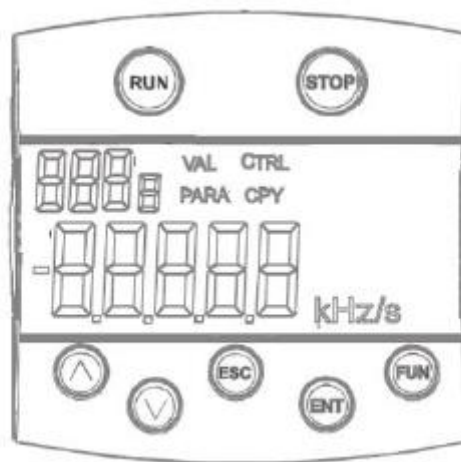
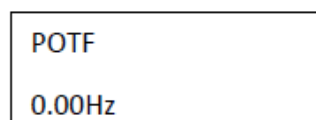


Figura 51. Pantalla del variador de frecuencia

Por lo tanto, para poner en funcionamiento el sistema de sales se seguirán los siguientes pasos:

1. Encender el interruptor general del cuadro eléctrico
2. Accionar el interruptor “Variador del motor”

Una vez realizados estos dos pasos principales, en la pantalla mostrada en la figura tal aparecerá el siguiente mensaje



3. Pulsar el botón ESC
4. Utilizar los botones tipo flecha para desplazarnos en la pantalla principal hasta que aparezca “Para”, que es el menú que permite modificar los parámetros del sistema

5. Pulsar ENT
6. Desplazarnos con los botones tipo flecha hasta que aparezca el número 418 en la esquina superior izquierda, permitiendo así establecer un valor de frecuencia mínimo
7. Pulsar ENT para confirmar
8. Con los botones tipo flecha establecer el valor de la frecuencia deseada para la realización del ensayo
9. Pulsar ENT para confirmar ese valor
10. Pulsar ESC varias veces hasta volver a la pantalla de menú principal

En este momento ya se ha grabado el valor de la frecuencia a emplear.

Finalmente, para activar o parar la bomba simplemente habrá que pulsar los botones RUN o STOP respectivamente. Cabe destacar que en el momento en el que se enciende o apaga la bomba es importante comprobar si el eje está moviéndose o parándose correctamente.